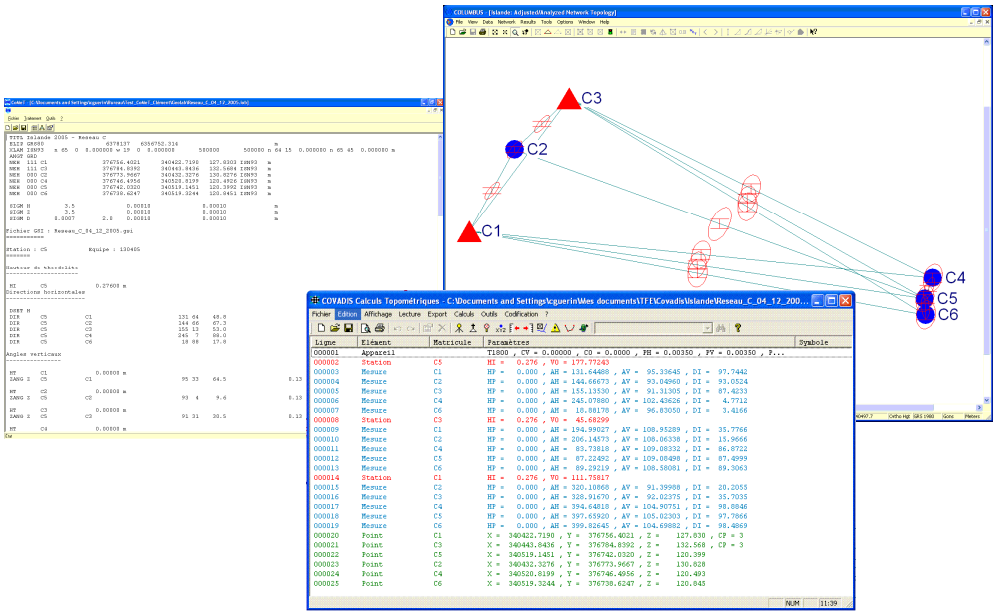
Ministère de L'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Conservatoire National des Arts et Métiers
École Supérieure des Géomètres et Topographes
1, Boulevard Pythagore – 72000 Le Mans

Mémoire de travail de fin d'études
présenté en vue de l'obtention du
Diplôme d'Ingénieur de l'ESGT

COMPARAISON DE LOGICIELS D'AJUSTEMENT DE MESURES TOPOGRAPHIQUES



Mémoire soutenu par :

Clément Guérin

Le 9 juillet 2010

Membres du jury :

- Président du jury : Mlle Elisabeth Simonetto
- Maitre de stage : M. Stéphane Durand
- Professeur Référent : M. José Cali

Remerciements

Je tiens à remercier en premier lieu mon maître de stage, Monsieur Stéphane Durand pour m'avoir accordé sa confiance pour ce mémoire, pour sa disponibilité, pour l'aide et les conseils avisés qu'il m'a fournis tout au long de ce stage et également pour sa naturelle sympathie qui a facilité nos échanges.

Je remercie mon professeur référent, Monsieur José Cali, pour m'avoir permis de prendre du recul sur mon sujet et pour ses conseils.

Je remercie l'IGN et l'ENSG pour m'avoir permis d'utiliser le logiciel Comp3D, et plus particulièrement Monsieur Jean-Michael Müller, développeur du logiciel, qui a répondu à mes questions, ainsi que Monsieur Serge Botton et Monsieur Franck Tertre.

Ma gratitude à Monsieur Pascal Ditgen responsable du développement du module Calcul en bloc du réseau du logiciel Covadis qui a très aimablement répondu à mes questions.

Des remerciements tout particuliers pour mes camarades de TFE, Angélique, Damien, Benoit, Antoine, Franck et Boureima, pour avoir passé ce stage dans une ambiance conviviale, pour les bons moments passés ensemble pendant 5 mois.

Je remercie également ma famille pour son soutien tout au long de mes études et pour les nombreuses relectures de mon rapport.

Glossaire

- CERN **C**onseil **E**uropéen pour la **R**echerche **N**ucléaire
- ESGT **É**cole **S**upérieure des **G**éomètres et **T**opographes
- ESRF **E**uropean **S**ynchrotron **R**adiation **F**acility
- EMQ **E**rreur **M**oyenne **Q**uadratique
- GCP **G**lobal **C**ompensation **P**rogram
- heigh-vd **H**aute **E**cole d'**I**ngénierie et de **G**estion du **C**anton de **V**aud
- Hes•so **H**aute **E**cole **S**pécialisée de **S**uisse **O**ccidentale
- IGN **I**nstitut **G**éographique **N**ational
- L2G **L**aboratoire de **G**éodésie et **G**éomatique
- LGC **L**ogiciel **G**énéral de **C**ompensation
- LGRMP **L**aboratoire de **G**éodynamique des **R**ifts et des **M**arges **P**assives
- MMC **M**éthode des **M**oindres **C**arrés
- PANDA **P**rogram for the **A**djustment of **N**etworks and **D**eformation **A**nalysis
- TFE **T**ravail de **F**in d'**É**tudes

Sommaire

REMERCIEMENTS 1

GLOSSAIRE 2

SOMMAIRE 3

TABLE DES ILLUSTRATIONS 5

A. Liste des figures 5

B. Liste des tableaux 5

INTRODUCTION 6

PARTIE 1 : PREMIERE APPROCHE DES LOGICIELS D'AJUSTEMENT 8

A. Les logiciels d'ajustement 8
1. Les différents types de logiciels 8
1.1. Les logiciels commerciaux 8
i. Les logiciels de topographie générale 8
ii. Les logiciels d'ajustement 9
1.2. Les logiciels non commerciaux 10
2. Nouvelle classification des logiciels d'ajustement 11

B. Descriptions et première comparaison 15
1. Geolab 15
1.1. Fonctionnement global 15
1.2. En entrée 16
1.3. En sortie 16
2. CoMeT 17
2.1. Fonctionnement global 17
2.2. En entrée 17
2.3. En sortie 17
3. Columbus 18
3.1. Fonctionnement global 18
3.2. En entrée 18
3.3. En sortie 19
4. Comp3D 19
4.1. Fonctionnement global 19
4.2. En entrée 20
4.3. En sortie 20
5. Covadis 21
5.1. Fonctionnement global 21
5.2. En entrée 23
5.3. En sortie 23

PARTIE 2 : SYNTHESE DES POSSIBILITES OFFERTES PAR LES DIFFERENTS LOGICIELS 24

A. Types de coordonnées acceptés en entrée 24

B. Validation des solutions 25

C. Régions de confiance et de fiabilité 27
1. Régions de confiance 27
2. Régions de fiabilité 28

D. Matrices associées au calcul 28

E. Informations sur les observations 29

F. Informations sur les solutions 30

PARTIE 3 : TEST DE L'INFLUENCE DE LA TAILLE DU CHANTIER 31

A. Présentation du réseau 31

B. Génération des mesures 32

C. Les fichiers du test 32
1. Les fichiers d'observations 32
2. Les fichiers de configurations 32

D. Résultats 33
1. Déplacement du point ajusté 33
1.1. Distance planimétrique 34
1.2. Écart sur les composantes verticales 35
2. Estimateur du facteur unitaire de variance 37

E. Bilan 39

PARTIE 4 : COMPARAISON SUR DEUX JEUX DE DONNEES REELLES 40

A. Présentation des données et du test 40
1. Les données de Reykjanes 40
2. Les données de la salle de métrologie 41

B. Mise en œuvre du test 41

C. Présentation des résultats 42
1. Estimateur du facteur unitaire de variance 42
2. Déplacement des points 43
2.1. Réseau de métrologie 43
2.2. Réseau de Reykjanes 43

D. Bilan 44

CONCLUSION 45

BIBLIOGRAPHIE 47

RESUME 49

ANNEXES 53

Table des illustrations

A. Liste des figures

FIGURE PAGE DE GARDE (De droite à gauche) :
Capture d'écran du logiciel CoMeT, © ESGT
Capture d'écran du logiciel Covadis, © GEOMEDIA S.A
Capture d'écran du logiciel Columbus, © 1995-2010 • Best-Fit Computing, Inc.

FIGURE 1 : TERRE LOCALEMENT PLATE - COURS TOPOMETRIE DE PRECISION ES2 (STEPHANE DURAND) 12
FIGURE 2 : ROTONDITE DE LA TERRE - COURS TOPOMETRIE DE PRECISION ES2 (STEPHANE DURAND)..... 12
FIGURE 3 : TRAITEMENT GLOBAL DES OBSERVATIONS DANS UN REPERE TRIDIMENSIONNEL GEOCENTRIQUE . 13
FIGURE 4 : GEOLAB, © 2010 BITWISE IDEAS INC. 15
FIGURE 5 : COMET, © ESGT 17
FIGURE 6 : COLUMBUS, © 1995-2010 • BEST-FIT COMPUTING, INC. 18
FIGURE 7 : COMP3D, © IGN 19
FIGURE 8 : COVADIS, © GEOMEDIA S.A. 21
FIGURE 9 : ORGANIGRAMME DU PRINCIPE DE CALCUL EN BLOC, D'APRES COVADIS GUIDE DE L'UTILISATEUR IV-35, (CLEMENT GUERIN). 22
FIGURE 10 : SCHEMA DU RESEAU ET EQUATIONS DES COORDONNEES DES POINTS 31
FIGURE 11 : DISTANCE PLANIMETRIQUE DU POINT P1 EN FONCTION DE LA TAILLE DU RESEAU ET DU LOGICIEL 34
FIGURE 12 : DISTANCE PLANIMETRIQUE DU POINT P1 EN FONCTION DE LA TAILLE DU RESEAU ET DU LOGICIEL - ZOOM SUR LES RESEAUX DE 0 A 2 KM - ECHELLE LOGARITHMIQUE 35
FIGURE 13 : DEPLACEMENT VERTICAL DU POINT P1 EN FONCTION DE LA TAILLE DU RESEAU ET DU LOGICIEL.. 36
FIGURE 14 : DEPLACEMENT VERTICAL DU POINT P1 EN FONCTION DE LA TAILLE DU RESEAU ET DU LOGICIEL - ZOOM SUR LES RESEAUX DE 0 A 2 KM 36
FIGURE 15 : ÉVOLUTION DE L'ESTIMATEUR DU FACTEUR UNITAIRE DE VARIANCE EN FONCTION DE LA TAILLE DU RESEAU POUR LES LOGICIELS COLUMBUS 3D GEODETIC, GEOLAB ET COMET 37
FIGURE 16 : ÉVOLUTION DE L'ESTIMATEUR DU FACTEUR UNITAIRE DE VARIANCE EN FONCTION DE LA TAILLE DU RESEAU POUR LES LOGICIELS COLUMBUS LOCAL, COMP3D ET COVADIS 38
FIGURE 17 : PLAN DU RESEAU DE REYKJANES OBTENU AVEC LE LOGICIEL COLUMBUS 40
FIGURE 18 : PLAN DU RESEAU DE LA SALLE DE METROLOGIE OBTENU AVEC LE LOGICIEL COLUMBUS 41

B. Liste des tableaux

TABLEAU 1 : TYPE DE MODELISATION UTILISEE PAR LES LOGICIELS DE COMPENSATION 14
TABLEAU 2 : LEGENDE 24
TABLEAU 3 : TYPES DE COORDONNES ACCEPTES EN ENTREE 24
TABLEAU 4 : VALIDATION DES SOLUTIONS 25
TABLEAU 5 : REGIONS DE CONFIANCE ET DE FIABILITE 27
TABLEAU 6 : MATRICES ASSOCIEES AU CALCUL 28
TABLEAU 7 : INFORMATIONS SUR LES OBSERVATIONS 29
TABLEAU 8 : INFORMATIONS SUR LES SOLUTIONS 30
TABLEAU 9 : ESTIMATEUR DU FACTEUR UNITAIRE DE VARIANCE 42
TABLEAU 10 : DEPLACEMENT DES POINTS M2 ET M10 - RESEAU DE METROLOGIE 43
TABLEAU 11 : DEPLACEMENT DES POINTS C2 ET C4 - RESEAU DE REYKJANES 44

Introduction

Les mesures topographiques sont utilisées par de nombreux organismes publics ou privés, les géomètres experts, les bureaux d'études ou les sociétés de travaux publics. Ces mesures sont essentiellement des mesures de distances suivant la pente, de distances zénithales et de lectures horizontales.

Que ce soit dans le cadre d'un simple lever topographique, d'une auscultation, ou de l'étude de déformations de terrain, ces mesures doivent être traitées pour déterminer les coordonnées des points. Pour cela, il existe de nombreux applicatifs capables de réaliser des calculs topométriques qui permettent de déterminer les coordonnées des points.

Ces applicatifs effectuent des ajustements de mesures pour calculer les coordonnées des points. Cela consiste à déterminer un ensemble de paramètres (coordonnées des points) et de leurs précisions associées à partir d'observations surabondantes (les mesures) et de constantes (les précisions a priori). (Cf. Mathématiques de l'ingénieur ES1 (1))

D'un coté nous avons les ajustements simples avec une mise en œuvre facile mais ils ne permettent pas de traiter un grand nombre de paramètres et leur théorie est imprécise. De l'autre nous avons la méthode des moindres carrés qui permet d'optimiser l'utilisation de l'observation avec l'apport de considérations statistiques.

Dans notre étude nous allons nous concentrer sur les logiciels qui réalisent des ajustements de mesures par la méthode des moindres carrés (2), et ce, pour plusieurs raisons : cela permet de limiter le nombre de logiciels étudiés (les applicatifs de calcul topométriques simples ne sont pas étudiés) et surtout, cela permet de comparer des logiciels sur une même base théorique.

A travers nos recherches bibliographiques, nous avons rencontré de nombreux logiciels d'ajustement que ce soit du simple utilitaire ou applicatif capable de fonctionner sous une plateforme spécifique jusqu'au programme destiné exclusivement à l'auscultation et qui gère l'automatisation du lever, le traitement des données et la sortie des résultats. Même s'il est difficile de dresser une liste exhaustive de tous les logiciels existants, il est indispensable de dresser une liste des logiciels les plus connus et courants avant de débuter notre étude.

Ces logiciels d'ajustement présentent de nombreuses possibilités, en particulier pour la modélisation des mesures. Certains vont permettre de prendre en compte des paramètres comme la rotondité de la Terre, l'erreur de centrage, d'autres vont proposer des critères d'information spécifiques tels que les estimateurs de précision des mesures ou des coordonnées finales. En fonction de la nécessité d'une mission, ces caractéristiques sont essentielles dans le choix du logiciel, qui pourra être préféré à un autre s'il traite les données de telle manière ou s'il fournit un indicateur de confiance spécifique.

Dans plusieurs notices, il est stipulé que le logiciel ne doit pas être utilisé au delà d'une certaine dimension de réseau. Par nos connaissances, nous savons que la prise en compte ou non de la rotondité de la Terre peut avoir une influence sur l'ajustement des réseaux à partir de quelques kilomètres. Mais en termes de résultat, quelle va être la limite d'utilisation d'un logiciel ? Le but est donc de quantifier cette limite. Quels sont les écarts entre les différentes manières de modéliser les mesures ? De nos jours, de plus en plus de géomètres-experts, ou de bureaux d'études diversifient leurs domaines de compétence. Ils disposent le plus souvent de logiciels comme Covadis capables de faire des ajustements mais ont une utilisation limitée. Dans le cadre de réseaux en dehors des limites d'utilisation des logiciels, il est alors intéressant d'étudier l'influence sur le résultat et sur la précision

de l'ajustement. Cela nous permettra de savoir pourquoi il faudra favoriser un logiciel plus qu'un autre et quels sont les paramètres qui rentrent en jeux.

Il est donc nécessaire de connaître les logiciels d'ajustement de réseau pour pouvoir privilégier un programme plus qu'un autre en fonction des limites et des avantages de chacun. Autant de problèmes que peut se poser une personne qui souhaite réaliser des ajustements de réseau et que l'on va tenter de résoudre dans ce travail.

Par ailleurs, depuis 2007, le L2G développe son propre logiciel d'ajustement, CoMeT (Compensation de Mesures Topographiques), capable de traiter des mesures topographiques et géodésiques. Il a été développé dans le but d'illustrer les cours de 2ème et 3ème année de topométrie de précision dispensés à l'ESGT. Il est également utilisé en recherche et il pourrait être à court terme exploité dans le cadre de prestations externes. Ce logiciel est intégré dans notre étude afin de valider son bon fonctionnement.

Dans un premier temps, nous allons effectuer un recensement des logiciels. Toutefois on pourra établir qu'une liste non exhaustive de tous les logiciels, car ils sont trop nombreux et parfois non connus du public. Une étude de l'ensemble de ces logiciels n'étant pas réalisable dans la durée du stage, nous allons nous concentrer sur un nombre restreint de programmes qui seront sélectionnés en fonction de leurs capacités. Pour cela une première étude sur les fonctionnalités des logiciels va être réalisée.

Dans un deuxième temps, pour les logiciels sélectionnés, nous quantifierons leurs limites d'utilisation. Pour cela nous effectuerons des tests d'ajustement sur des réseaux de taille croissante que nous créerons en générant des mesures puis nous analyserons les résultats fournis par chaque logiciel.

Enfin nous comparerons les résultats obtenus par les différents logiciels sur des jeux de données réelles dans des environnements différents et avec plus d'observations afin de regarder les écarts entre les logiciels en termes de précisions et de résultats.

Partie 1 : Première approche des logiciels d'ajustement

A. Les logiciels d'ajustement

1. Les différents types de logiciels

Il existe de nombreux logiciels d'ajustement permettant le traitement des mesures topographiques. Nous allons nous concentrer sur ceux réalisant des ajustements en bloc en utilisant la méthode des moindres carrés (MMC). Outre les tableurs (Excel, Calc) ou les environnements de calcul numérique (Scilab, Matlab) qui permettent de réaliser des traitements de données en construisant manuellement un système de moindres carrés et ainsi effectuer un ajustement de mesures, on peut distinguer trois catégories de logiciels en se basant sur leur origine et leur utilisation :

- Les logiciels commerciaux de topographie destinés aux applications topographiques générales,
- Les logiciels commerciaux destinés aux applications topographiques spécialisés dans l'auscultation, la surveillance ou la compensation de réseaux.
- Les logiciels développés par différents organismes pour des besoins internes et qui ne sont pas commercialisés.

Nous allons établir une liste non exhaustive de logiciels, permettant le traitement de données topographiques pour faire de l'ajustement de réseau, rencontrés à travers diverses recherches bibliographiques.

1.1. Les logiciels commerciaux

i. Les logiciels de topographie générale

Dans cette famille, on peut citer les logiciels développés par les constructeurs d'instruments de mesures, tel que Trimble avec « **Trimble Geomatics Office** » (3), Leica avec **« LEICA Geo Office** » (4), et TOPCON avec « **Logiciel de Topographie Standard (SSS)** » (5). Ces programmes ne seront pas étudiés dans la suite du TFE car ils sont essentiellement conçus pour utiliser des données "constructeurs".

Il existe également des logiciels généralistes indépendants des fabricants de matériel topographique, qui sont couramment utilisés pour le traitement de données topographiques. Ils proposent de nombreux outils métiers complets qui sont utilisés par les géomètres-experts, les topographes, les bureaux d'études, les sociétés de travaux-publics, les collectivités et administrations. Les plus connus sont :

- **TopStation** de JSInfo (6), il est lancé en 1997 et succède à TopoJis. Depuis 2002, il est développé pour être utilisé sous la plateforme graphique Bentley Microstation, ou sous AutoCAD, et peut être utilisé de manière autonome. On peut effectuer des projets d'aménagements, des calculs topométriques, de la codification, des profils et cubatures, des traitements numériques de document d'arpentage, de la mise en forme de plans d'intérieurs, de l'affichage des coupes, ainsi que de la création et de l'édition de lots de copropriété. Aujourd'hui plus de 1500 clients l'utilisent à travers le monde francophone. (Chiffres issus du site internet de JSinfo)

- **Covadis** de GEOMEDIA S.A. (7). Il s'agit d'un applicatif d'AutoCAD en topographie, dessin assisté, projet de lotissements, modèle numérique de terrain, conception 3D, terrassement multi plates-formes, rendu 3D, infrastructure et projets VRD (Voirie et Réseau Divers). En mai 2010, 4200 utilisateurs sont recensés en Europe. (Chiffres issus du site internet de GEOMEDIA S.A)

Ces deux derniers logiciels sont les plus intéressants car on peut importer des carnets de terrain issus de nombreux appareils topographiques de marque quelconque. L'importation des données s'effectue de manière intuitive en fonction du format des données en entrée. Ils permettent de nombreux calculs topométriques et ils ne sont pas destinés exclusivement à l'ajustement de mesures.

D'autres programmes et applicatifs moins connus existent et sont plus orientés sur le traitement exclusif des mesures :

- **Géoset** de SETAM Informatique (8). Mireille Vincenti (9) le présente dans sont TFE sur l'auscultation d'une façade en milieu urbain, et, d'après ces travaux, il semble que les méthodes de calcul d'ajustement soient similaires au logiciel Covadis.

- **Mensura** de GEOMENSURA (10). Ce logiciel fonctionne sous sa propre plateforme, il est destiné à la conception de projet d'infrastructure et de VRD. Un mode de calcul en bloc est en cours de réalisation et devrait apparaitre dans la prochaine version.

ii. Les logiciels d'ajustement

Ce sont des logiciels qui sont exclusivement destinés à la compensation de réseaux ou à la surveillance de déformations. Ils donnent de nombreuses informations sur le déroulement des calculs, les précisions sur les coordonnées ajustées et réalisent différents tests statistiques sur la solution et les résidus. Au cours de notre recherche bibliographique, nous avons pu recenser :

- **Columbus** de Best-Fit computing (11), son développement a commencé en 1987, à la suite d'un projet d'ajustement d'un réseau géodésique dans le Colorado. Il est actuellement disponible dans la version 3.8.1.22, et dispose d'une version d'essai qui permet de traiter un nombre limité de données.

- **Geolab** de BitWise Ideas Inc. (12), développé au Canada par le Dr. Robin Steeves en 1982 pour l'ajustement du réseau géodésique[1] canadien. Ce logiciel a été ensuite développé depuis 1985 pour une utilisation professionnelle, son but étant l'ajustement de réseau par moindres carrés.

- **Leica GeoMoS**, développé par Leica Geosystems (13). Il s'agit d'un logiciel de surveillance et d'analyse composé de deux applications principales : Monitor, pour l'acquisition de données et le pilotage de capteurs et Analyzer, pour le post traitement, l'analyse et la visualisation. Il ne sera pas étudié dans la suite du TFE car il fonctionne principalement avec des données "constructeur".

- **LTOP** de Swisstopo (14), logiciel développé par l'Office Fédéral de Topographie Suisse depuis 1994, il est disponible dans la version 99.6.1. Une version d'essai est téléchargeable sur internet mais elle peut traiter un nombre limité de données. Il est très utilisé en Suisse car c'est le logiciel de la Mensuration Officielle Nationale.

[1] Un réseau géodésique est un ensemble de points dont les coordonnées sont définies, estimées par rapport à un système géodésique

- **PANDA** (« Program for the Adjustment of Networks and Deformation Analysis ») de Geotec GmbH (15), développé en Allemagne depuis 1990. Il est actuellement disponible en version 3.XX et combine un programme d'ajustement de réseau et un programme d'analyse de déformations.

- **SpatialAnalyzer** de New River Kinematics (16). Ce logiciel développé en langage « Visual C++ » permet l'ajustement de réseau mais il est principalement destiné à l'industrie pour la modélisation 3D à partir de divers types d'appareils de mesures (laser tracker, laser scanner, théodolite, station total, GPS, Bras articulé de mesure). Il est utilisé entre autres par la NASA, Boeing, Airbus, Toyota, Honda.

1.2. Les logiciels non commerciaux

Ces logiciels sont le plus souvent développés par des organismes pour un fonctionnement en interne et ne sont pas disponibles à la commercialisation. J'ai recensé les cinq logiciels ci-dessous :

- **Comp3D** développé par l'IGN en collaboration avec la société Soldata par Yves EGELS, il est repris par la suite par le personnel de l'IGN. Il permet le traitement de données topographiques et de données issues de lever par laser scanner. Ce logiciel est étudié dans le TFE de Sébastien DOUCHE en 2002 (17) et les fondements mathématiques de Comp3D sont détaillés dans son manuel d'utilisation (18).

- **CoMeT** (Compensation de Mesures Topographiques), est développé par Stéphane Durand. C'est un logiciel d'ajustement de réseau, qui est développé sur la base des cours de topométrie de précision dispensés à l'ESGT en 2ème et 3ème année.

- **GCP** (« Global Compensation Program ») développé par l'ESRF et principalement par M. Gilles GATTA sur la base du logiciel LGC. On peut avoir un aperçu détaillé du fonctionnement du logiciel GCP dans le TFE de Geoffroy EMAIN sur l'analyse des relevés topographiques de l'ESRF en 2006 (19).

- **LGC** (« Logiciel Général de Compensation ») développé au CERN pour l'alignement des composants des accélérateurs de particules, dont le dernier en date le LHC (Large Hadron Collider). Ce logiciel créé initialement en fortran 77 a été traduit par Mark Jones pour la version en C voici quelques années. Plusieurs ouvrages internes au CERN traitent de ce logiciel et de la théorie des erreurs utilisée dans ce programme en particulier un ouvrage de Mark Jones, « More News Options for LGC » (20) et un de Chris McCain « Reliability testing and LGC » (21).

- **LRA** développé par la société AXIS-Conseils, ce logiciel de saisie et de traitement est élaboré en interne depuis 1985 à partir du noyau graphique AutoCAD. C'est un outil de calculs topographiques qui permet une compensation en bloc 3D. Il est étudié dans le TFE de Magalie Rayer en 2008 (22), et, d'après ces analyses, semble être similaire à Covadis.

- **TRINET+** développé par la heigh-vd et la Hes•so (23). Il a été conçu dans le cadre de travaux de diplômes des filières de géomatique des écoles d'ingénieurs de Muttenz et d'Yverdon-les-Bains en 1999 et 2002, il s'agit d'un logiciel de préanalyse et de compensation de réseaux tridimensionnels développé pour la réalisation de prestations.

2. Nouvelle classification des logiciels d'ajustement

Une lecture plus attentive des différents manuels utilisateurs ou des références bibliographiques permet de mettre en place une autre classification des logiciels. Comme précisé par exemple dans le cours de topométrie de précision de 2ème année de l'ESGT (24), les mesures topographiques classiques (distance pente, distance zénithale et lecture horizontale) s'expriment de manière simple en fonction des coordonnées 3D locales des points (visé et stationné) dans le repère local associé au point stationné. On a ainsi pour un point stationné M_1 de coordonnées $(x_1^{(1)},\ y_1^{(1)},\ z_1^{(1)})$ et un point visé M2 de coordonnées $(x_2^{(1)},\ y_2^{(1)},\ z_2^{(1)})$ dans le repère local associé au point M_1 :

- **La distance suivant la pente D_{12}** observée depuis le point M_1 sur le point M_2 s'exprime en fonction des coordonnées locales des points M_1 et M_2 par :

$$D_{12} = \sqrt{\left(x_2^{(1)} - x_1^{(1)}\right)^2 + \left(y_2^{(1)} - y_1^{(1)}\right)^2 + \left(z_2^{(1)} - z_1^{(1)}\right)^2}$$

- **La direction horizontale V_{12}** observée depuis le point M_1 sur le point M_2 s'exprime en fonction des coordonnées locales des points M_1 et M_2 et du gisement du zéro du limbe $G_{0,1}$ par :

$$V_{12} = \tan^{-1}\left(\frac{x_2^{(1)} - x_1^{(1)}}{y_2^{(1)} - y_1^{(1)}}\right) - G_{0,1}$$

- **La distance zénithale D_{Z12}** observée depuis le point M_1 sur le point M_2 s'exprime en fonction des coordonnées locales des points M_1 et M_2 par :

$$D_{Z12} = \tan^{-1}\left(\frac{\sqrt{\left(x_2^{(1)} - x_1^{(1)}\right)^2 + \left(y_2^{(1)} - y_1^{(1)}\right)^2}}{\left(z_2^{(1)} - z_1^{(1)}\right)}\right)$$

Lorsque l'on traite un ensemble de mesures réalisées depuis plusieurs stations, la difficulté est d'exprimer les équations d'observation associées aux différentes mesures en fonction de coordonnées dans un repère commun à l'ensemble des stations, alors qu'à l'origine, ces équations d'observation sont exprimées en fonction des coordonnées locales associées aux repères locaux de chaque station.

Nous pouvons ainsi distinguer trois manières de gérer ces changements de repères au niveau du calcul :

- ***« Terre plate »***, il s'agit de l'hypothèse d'une terre localement plate où l'on considère que les repères locaux associés à chaque point stationné sont parallèles. Dans ce cas, la modélisation des observations est simplifiée et peut être facilement réalisée sous tableur ou dans un quelconque langage de programmation.

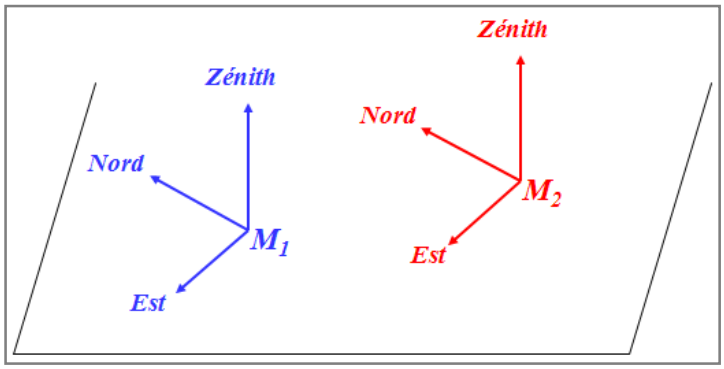


Figure 1 : Terre localement plate - Cours Topométrie de précision ES2 (Stéphane DURAND)

Dans le modèle de terre plate (Figure 1), il y a seulement une translation entre les repères associés aux stations, les observations peuvent être traitées globalement. On peut donc utiliser les équations précédentes.

Nous retrouvons dans cette catégorie :

- **CoMeT**, il dispose d'un mode de calcul en terre plate.
- **Covadis**, le TFE de Mireille Vincenti (9) montre que l'ajustement par l'option de calcul en bloc est similaire à l'utilisation de cette hypothèse de terre plate.
- **Géoset**, également étudié dans le TFE de Mireille Vincenti (7), avec la même conclusion.
- **LRA**, le TFE de Magalie Rayer (22) semble conclure à une similitude avec Covadis et le cours de 2ème année de topométrie de précision.
- **PANDA**, le site internet (25) stipule que le logiciel peut utiliser des coordonnées locales, ce qui laisse à penser qu'il fonctionne également avec une hypothèse de terre plate.
- **TopStation**, l'aide fournie dans le logiciel permet de conclure qu'il fonctionne dans un système local, qui décompose la planimétrie et l'altimétrie selon un modèle de terre plate.

➢ ***« Terre sphérique »,*** la surface de la terre est approximée par une sphère de référence dont la surface est orthogonale à la verticale du point situé au milieu du chantier. Dans ce type de modélisation, il est important de préciser la position (latitude) du point situé au milieu du chantier (point central du chantier).

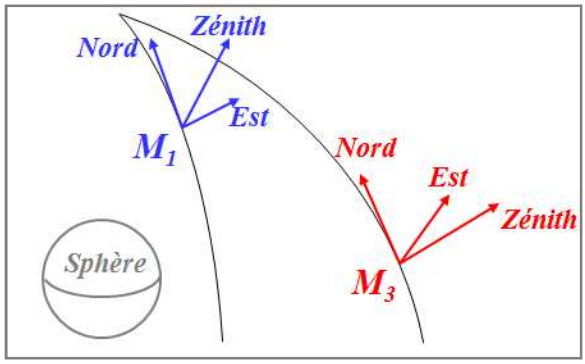


Figure 2 : Rotondité de la Terre - Cours topométrie de précision ES2 (Stéphane DURAND)

La prise en compte de la rotondité de la terre (Figure 2) qui est modélisée par une sphère dans cette catégorie suppose que les repères locaux associés à deux stations ne sont plus parallèles. Cela implique une matrice de passage entre les deux repères pour traiter les observations globalement.

Nous retrouvons dans cette catégorie :

- **Comp3D**, la documentation sur les fondements mathématiques (18) précise que ce logiciel fonctionne par défaut avec des coordonnées sphériques.
- **PANDA**, le site internet (25) stipule que le logiciel peut utiliser des coordonnées sphériques ce qui laisse à penser qu'il fonctionne également dans un modèle de terre sphérique.

- ***« Terre ellipsoïdale »,*** la terre est modélisée par un ellipsoïde de référence, les coordonnées cartésiennes seront exprimées en fonction des coordonnées ellipsoïdales et on ramène les équations d'observation dans le repère cartésien géocentrique lié à l'ellipsoïde de référence.

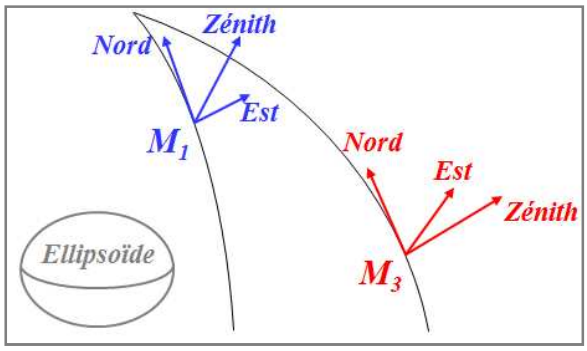


Figure 3 : Traitement global des observations dans un repère tridimensionnel géocentrique

Dans le cas d'un modèle de type « Terre ellipsoïdale », la prise en compte de la rotondité de la terre (Figure 3) suppose que les repères locaux associés à deux stations ne sont plus parallèles. Cela implique une matrice de passage plus complexe entre les deux repères pour traiter les observations globalement.

Nous retrouvons dans cette catégorie :

- **Columbus**, (Cf. le manuel utilisateur (26))
- **CoMeT**, (Cf. document interne L2G)
- **GCP**, (Cf. le TFE de Geoffroy Emain (19))
- **Geolab**, (Cf. le manuel utilisateur (27))
- **LGC**, (Cf. les documents réalisés par Mark Jones (20) et Chris McCain (21))
- **LTOP**, (Cf. la description du manuel LTOP (28))
- **PANDA**, (Cf. le guide sur les informations générales du logiciel (15))
- **TRINET+**, (Cf. le mode d'emploi (23))

Le tableau ci-dessous résume le type de modélisation utilisé par les logiciels de compensation (Tableau 1):

Tableau 1 : Type de modélisation utilisée par les logiciels de compensation

	Terre plate	Terre sphérique	Terre ellipsoïdale
Covadis	✓		
TopStation	✓		
Géoset	✓		
LRA	✓		
Columbus	✓		✓
CoMeT	✓		✓
GCP			✓
Geolab			✓
LGC			✓
LTOP			✓
TRINET+			✓
PANDA	✓	✓	✓
Comp3D		✓	
SpatialAnalyzer	Pas d'information		

Parmi les logiciels recensés, seulement quelques uns sont étudiés dans la suite de ce travail. Une étude approfondie de l'ensemble des logiciels présentés précédemment n'est pas réalisable dans la période du stage, et une sélection a été nécessaire pour limiter le travail de comparaison.

Afin de réaliser cette sélection, nous avons utilisé notre classement et sélectionné dans chaque catégorie un ou plusieurs logiciels :

- Catégorie « Terre plate » : **Covadis**

Parmi les logiciels capables de traiter les mesures suivant un modèle de terre plate nous avons sélectionné Covadis. En effet, ce logiciel est très répandu, dans le monde professionnel des géomètres et topographes (4200 utilisateurs annoncés) et notre étude pourra ainsi intéresser un plus large public. De plus, après une lecture attentive des manuels d'utilisation et des TFE de Mireille VINCENTI (9) et Magalie RAYER (22), il semble que les logiciels de topographie générale, Covadis, Géoset, LRA et TopStation donnent des résultats semblables. Les résultats obtenus avec le logiciel Covadis seront donc extensibles aux 3 autres.

Bien que le logiciel CoMeT propose une option de calcul en Terre plate, celle-ci est peu utilisée et pas encore complètement testée. Lors de nos premiers essais, nous avons rencontré quelques bugs dans le traitement des données en terre plate avec CoMeT. Nous donc avons préféré pour l'instant ne pas inclure CoMeT avec l'option Terre plate dans la suite des comparaisons.

- Catégorie « Terre sphérique » : **Comp3D**

Seulement deux logiciels rencontrés dans nos recherches peuvent traiter un ajustement d'après un modèle sphérique, Comp3D et PANDA. Ce dernier a été étudié en fin de TFE et n'a pas été sélectionné. Nous avons donc choisi Comp3D pour la suite de la comparaison.

- Catégorie « Terre ellipsoïdale » : **CoMeT, Geolab, Colombus**

Dans les logiciels qui modélisent selon une terre ellipsoïdale et prennent également en charge des modèles de géoïde, GCP et LGC utilisent des géoïdes qui sont spécifiques à une région et sont donc d'un intérêt moindre pour l'utilisateur lambda.

De nombreuses difficultés ont été rencontrées dans la prise en main de LTOP, et la mise en place d'une projection spécifique ne semblant pas être possible nous l'avons écarté de la suite de l'étude par manque de temps. PANDA n'a pas été retenu pour la raison présentée précédemment.

Par ailleurs, Geolab est utilisé depuis une dizaine d'années pour les travaux pratiques aux seins de l'ESGT et CoMeT utilise les mêmes fichiers d'observation en entrée. Une première approche de Columbus a permis de découvrir des possibilités de calcul semblables à CoMeT : ils peuvent tous les deux traiter des données suivant différents types de modélisations (terre plate et terre ellipsoïdale). Il est donc intéressant de les inclure dans la sélection des logiciels étudiés par la suite.

Afin de mieux comprendre le fonctionnement de ces 5 logiciels sélectionnés (Covadis, Comp3D CoMeT, Geolab et Columbus), nous allons les décrire plus précisément et faire une première comparaison.

B. Descriptions et première comparaison

Une première analyse détaillée est nécessaire afin de pouvoir prendre en main chacun des logiciels sélectionnés pour la suite de l'étude. Cette description va permettre de mieux comprendre les formats d'entrée et de sortie ainsi que les possibilités de calcul de chaque programme, mais surtout d'établir les options de traitement que l'on peut prendre en commun pour l'ensemble des logiciels.

1. Geolab

1.1. Fonctionnement global

Geolab est composé d'un logiciel d'ajustement et d'un explorer qui permet de lire les fichiers générés à l'issue des calculs comme la matrice de covariance, les paramètres, etc. L'interface est en anglais, tout comme le manuel d'utilisation (27).

Figure 4 : Geolab, © 2010 BitWise Ideas Inc.

Quelques caractéristiques de Geolab :

- Il fonctionne avec n'importe quels types de coordonnées (cartésiennes géocentriques, géographiques, planes, ou locales),
- Il peut utiliser n'importe quelle projection et ou ellipsoïde de référence,
- Il peut effectuer un ajustement vertical, horizontal, ou tridimensionnel
- Le traitement global des observations s'effectue dans un repère tridimensionnel géocentrique,
- Il réalise aussi bien des ajustements que des simulations,
- Il traite des données topographiques et GPS (vecteur des différences de coordonnées),
- Un outil permet également de transformer les coordonnées.

Une nouvelle version est en cours de développement, Geolab 2010, et devrait normalement sortir dans le courant de l'été 2010. Des améliorations sont prévues, comme le remaniement de l'interface utilisateur qui devrait être plus intuitive en particulier pour la saisie des informations, ainsi qu'une modernisation du système d'aide.

1.2. En entrée

Pour utiliser Geolab, il faut deux fichiers :

- « .iob », qui contient les informations nécessaires à la construction du système des moindres carrés,
- « .gpj », pour les paramètres de configuration.

Le fichier « .iob » est un fichier texte au format ASCII où chaque ligne contient une information. La saisie est assez contraignante car il faut respecter un formalisme très précis à l'espace près. Dans ce fichier, nous trouvons en particulier les coordonnées des points connus et éventuellement inconnus, les observations, les précisions a priori, et si besoin les informations sur la projection et l'ellipsoïde utilisés pour la transformation des coordonnées. Ces dernières informations peuvent être également précisées directement dans le fichier de configuration.

Le fichier de configuration permet de renseigner :

- les paramètres d'ajustement, le critère de convergence, le nombre d'itération maximum, les options de calculs,
- les paramètres statistiques, sur le facteur de variance, le calcul des régions de confiance, les seuils de confiance pour les tests et les régions de confiance, ainsi que la loi utilisée pour la validation individuelle des observations.
- les paramètres de sortie, avec le nombre de décimales pour les mesures, la réalisation du test du chi-deux,
- les informations imprimées dans le rapport de sortie (régions de confiances, intervalles de confiance, types des coordonnées ajustées, …).

A noter que certaines informations peuvent être saisies directement dans le fichier « .iob » par ligne de commande, et que ce sont ces dernières qui primeront sur le fichier « .gpj ».

1.3. En sortie

Une fois les calculs effectués, Geolab génère un rapport, « .lst », qui contient les résultats de l'ajustement, ainsi qu'un dessin du réseau avec les ellipses et les intervalles de confiance. Le contenu du fichier et du dessin dépendent des options sélectionnées dans le fichier de configuration dans la section relative aux informations imprimées dans le fichier résultat (voir ci-dessus, Partie 2, 1-a).

Peuvent apparaître dans le rapport:

- Les paramètres et les observations qui composent le système des moindres carrés,
- Les options de calcul sélectionnées,
- Les coordonnées a priori des points,
- Les « Misclosures », la différence entre les observations mesurées ramenées à la marque et les observations calculées à partir des coordonnées approchées des points,
- Les solutions intermédiaires, à chaque itération de la méthode des moindres carrés.
- Les solutions finales, avec les précisions sur les coordonnées, dans différents types de coordonnées,
- Les résidus, avec leurs précisions et le résultat de leur validation
- La distribution des résidus,
- Un résumé statistique, avec le résultat du test du χ^2, les seuils pour la validation individuelle des observations,
- Les régions de confiance.

2. CoMeT

2.1. Fonctionnement global

Il est développé par M. Stéphane Durand au sein du L2G, sur la base des enseignements de topométrie de précision dispensés en 2ème et 3ème année de l'ESGT. Il est en français, son principe d'utilisation est similaire à Geolab, et utilise le même type de fichier en entrée « .iob », ce qui permet de comparer facilement les résultats d'un logiciel à l'autre. Il a donc des caractéristiques similaires avec Geolab :

Figure 5 : CoMeT, © ESGT

- Il fonctionne en mode de ligne de commande,
- Il fonctionne avec n'importe quels types de coordonnées (cartésiennes géocentriques, géographiques, ou planes),
- Il réalise aussi bien des ajustements que des simulations,
- Il traite des données topographiques et GPS,
- Il peut effectuer un ajustement vertical, horizontal, ou tridimensionnel

CoMeT offre des possibilités spécifiques de calcul peu développées, tel que :

- Les régions de fiabilité ou les coefficients de fiabilité des mesures,
- On peut choisir le type de calcul soit en 3D complète, la terre étant approximé par un ellipsoïde, soit par un calcul en local, la terre étant considérée comme plate,
- On peut aussi générer des mesures, à partir des coordonnées des points, en précisant le type des observations à générer et leur précision a priori.
- CoMeT propose une option d'ajustement robuste, utilisant l'ajustement en norme L1

Au cours des différents tests qui sont réalisés dans la suite de l'étude plusieurs bugs sur l'option nouvelle de génération des mesures ont été relevés ce qui a en partie ralenti les tests où ces mesures étaient nécessaires. En particulier sur les angles horizontaux et pour le calcul du Vo.

2.2. En entrée

En entrée il faut deux fichiers, le fichier des observations et des coordonnées, et le fichier de configuration :

- « .iob », c'est le même fichier utilisé par Geolab, il suit le même formalisme avec les informations nécessaires à la création des équations du système des moindres carrés, et les paramètres de projection ainsi que l'ellipsoïde,
- « .cfg », le fichier configuration avec les paramètres.

Dans le fichier de configuration on renseigne :

- Les paramètres d'ajustement,
- Les paramètres statistiques, sur le facteur unitaire de variance et les régions de confiances,
- Les paramètres de fiabilité pour les régions de fiabilité,
- Les paramètres du rapport,
- Les informations sur l'extraction des matrices.

2.3. En sortie

A la fin du calcul, des fichiers « .txt » sont générés, il y a le rapport et les matrices extraites par le logiciel pendant le calcul. Ces fichiers vont dépendre de ce que l'on a mis dans le fichier de configuration.

Peuvent apparaître dans le rapport:
- Résumé des options,
- Solution des moindres carrés,
- Information sur les résidus,
- Information sur la fiabilité des observations,
- Résumé de la partie statistique (test du chi-deux, estimateur du facteur unitaire de variance, …)
- Intervalle de confiance, ellipse de confiance 2D et 3D,
- Segment, rectangle et pavé de fiabilité sur les coordonnées 1D, 2D ou 3D

Parmi les matrices que l'on peut extraire, on a les matrices initiales du système des moindres carrés, (A : la matrice des dérivées partielles, B : le vecteur des mesures, P : la matrice des poids), les matrices du système normal, (N : la matrice normale, N^{-1} : inverse de la matrice normale, C : la matrice second membre). Il y a également le vecteur des résidus des mesures (V) et le vecteur des solutions (X).

3. Columbus

3.1. Fonctionnement global

Ce logiciel américain d'ajustement de réseau développé par « BEST-FIT computing » dispose d'une interface et d'un manuel utilisateur en anglais (26).

Columbus fonctionne selon un principe de « vue active » qui détermine le système dans lequel va être effectué l'ajustement. Les calculs vont dépendre de la « vue active » sélectionnée. Il y a 10 contextes définis dans le logiciel, qui correspondent chacun à un type d'ajustement. Dans ce TFE, nous allons principalement étudier les deux modes de calculs suivant :
- 3D Geodetic, l'ajustement s'effectue dans l'espace 3D (Terre = ellipsoïde)
- Local NEE (3D), avec une altitude constante. L'ajustement s'effectue en local (Terre localement plate) avec prise en compte de la courbure terrestre.

Les autres contextes de calculs sont :
- 1D Vertical, pour un ajustement de réseau de nivellement
- 2D Geodetic, avec une altitude constante
- Cartesian XYZ,
- State Plane 2D,
- State Plane 3D,
- UTM 2D, utilisant la zone du projet,
- UTM 3D.
- Local NE (2D), avec une altitude constante

BEST-FIT COMPUTING
Dedicated to simplifying geodesy

Figure 6 : Columbus, © 1995-2010 • Best-Fit Computing, Inc.

Pour les projets en mode « State Plane » il faut utiliser une projection prédéfinie ou renseigner une des 4 projections à notre disposition (Transverse Mercator, Azimutale équidistante, Lambert sécante ou Lambert tangente). C'est le même principe pour les projets en mode « UTM ».

Au fur et à mesure que l'on rentre les observations et les stations, un dessin se crée automatiquement ce qui permet de visualiser le réseau avec les observations entre stations.

3.2. En entrée

Il faut renseigner dans un premier temps dans quelle vue on va réaliser l'ajustement, et choisir l'ellipsoïde avant de commencer la saisie des informations. Cette saisie peut se faire soit directement dans un fichier texte soit par l'intermédiaire de l'interface prévue par le logiciel, ce qui est le plus pratique. Dans le fichier texte, on va retrouver les informations sur l'ellipsoïde, les unités de mesures, les coordonnées des points, s'ils sont fixes ou non, et les observations.

Le fichier d'option se trouve dans le répertoire d'installation du logiciel et se nomme « Columbus.optlib ». On peut créer des sauvegardes qui viendront s'enregistrer dans ce fichier les unes à la suite des autres.

Les options sont réparties en plusieurs groupes, il y a :

- Les options pour les unités,
- Les options générales, avec le critère de convergence, le nombre maximum d'itérations, la valeur du coefficient de réfraction, les paramètres de déviation de la verticale, la latitude approchée du chantier pour les ajustements en local, et les informations sur les hauteurs,
- Les ellipsoïdes et les projections,
- Les options du réseau d'ajustement, avec les précisions, et les options du rapport.

3.3. En sortie

A la fin de l'ajustement, Columbus génère automatiquement un rapport où l'on va retrouver les informations ci-dessous si elles ont été sélectionnées en option :

- Un résumé de l'ajustement avec les paramètres de calcul qui composent le système des moindres carrés et les tests statistiques,
- Les coordonnées ajustées avec les résidus,
- Les coordonnées ajustées avec les matrices de covariances,
- Les différences de coordonnées entre les coordonnées approchées et les coordonnées ajustées,
- La distribution des résidus,
- Les intervalles de confiance sur les hauteurs des stations,
- Les distances de confiance,
- Les cercles de confiance,
- Les ellipses de confiance,
- Les ellipsoïdes de confiance.

4. Comp3D

4.1. Fonctionnement global

Ce logiciel permet un ajustement simultané des observations planimétriques et altimétriques. Il a été développé par le Docteur Yves EGELS, de l'IGN dans le cadre d'un partenariat avec la société SolData. Il permet également la compensation de réseau mais aussi la simulation de réseau, et peut traiter des données issues de tracker laser. Les calculs sous Comp3D s'effectuent dans un repère local tridimensionnel, et les coordonnées sont supposées être données dans une projection stéréographique oblique (29). Le système local est défini par une sphère tangente à l'ellipsoïde au centre du chantier, ainsi le rayon de la sphère est égal à la courbure totale de l'ellipsoïde au point de tangence.

Figure 7 : Comp3D, © IGN

La première étape de Comp3D consiste à créer un chantier où l'on va renseigner son centre et sa latitude moyenne, ainsi que les fichiers des observations et des coordonnées. Une fois le chantier enregistré, nous arrivons sur une fenêtre qui permet de réaliser la compensation, et d'obtenir les résidus avant compensation. Nous pouvons sélectionner si on inverse la matrice normale et si on utilise des contraintes internes. Ces dernières imposent au barycentre du chantier une limite en termes de déplacement, le poids de ces contraintes ajoutées au calcul peut être choisi manuellement.

Lorsque l'ajustement est effectué, nous obtenons les résidus de chaque observation ainsi que les coordonnées après compensation, on peut alors désactiver certaines observations et recommencer l'ajustement. Pour avoir plus de détails on peut consulter le rapport qui est créé automatiquement. Comp3D affiche l'estimateur du facteur unitaire de variance mais ne réalise pas de test de validation.

4.2. En entrée

Pour réaliser un ajustement, il faut trois fichiers au format texte et en ASCII :

- « .cor », le fichier des coordonnées. Il contient les coordonnées des points approchés et les coordonnées des points connues. Pour ces derniers on a également leurs précisions données par (σ_{plani}, σ_{alti}) ou (σ_x, σ_y, σ_z). Ces points ont donc une incertitude sur leur position, il n'y a pas de point fixe. Plus la précision des points connus sera importante plus elle va contraindre l'ajustement.
- « .obs », le fichier des observations. Il comprend une ligne par mesure, avec dans l'ordre le code indiquant la mesure, les noms de la station et du point visé, la valeur mesurée, la précision estimée de la mesure, et les hauteurs de station et de voyant.
- « .cfg », le fichier de configuration. Il permet de renseigner les unités des angles, le nombre de chiffres significatifs, le coefficient de réfraction, l'origine du chantier, la latitude moyenne du chantier, et le type de calcul à réaliser (compensation ou simulation). (Attention ce fichier enregistre les données du dernier chantier, à chaque enregistrement d'un chantier il efface les données précédentes.)

Pour la saisie des observations, les fichiers issus des appareils ne peuvent pas être directement utilisés. Il faut donc créer manuellement le fichier et le formater correctement. L'IGN a développé un logiciel, PrepaComp, qui permet de passer du format GSI de Leica à un format OBS. Pour des données issues d'autres constructeurs, il faudra rentrer manuellement les mesures dans les fichiers « .obs » et « .cor ».

4.3. En sortie

Une fois le calcul fait on peut enregistrer les résultats et un rapport, on dispose alors de 3 nouveaux fichiers :

- « .xml », le rapport.
- « .new », les coordonnées compensées
- « .3d », les coordonnées 3D compensées (dans le repère cartésien centré au point origine / Axe Z selon la verticale au point origine)

Dans le rapport on a :

- la configuration du chantier,
- les informations de calcul,
- les coordonnées initiales,
- la lecture des mesures avec les résidus, et la redondance s'il y a inversion de la matrice normale,
- un classement des résidus par leur importance,
- les coordonnées 3D compensées,
- les coordonnées compensées,
- les ellipsoïdes de confiance,
- les écarts types,
- un classement des sigmas par leur importance.

} Si inversion de la matrice normale

Comp3D fourni deux informations sur les résidus : les résidus dits « standards » et ceux dits « normés ». La définition donnée par le manuel de Comp3D (18) pour ces résidus est la suivante :

$$Résidu_{normé} = \frac{v_i}{\sigma_i} \qquad Résidu_{standardisé} = \frac{v_i}{\rho_i}$$

Avec v_i le résidu, σ_i la précision a priori de la mesure et ρ_i la précision a posteriori des résidus.

Attention les résidus normés des logiciels Columbus, CoMeT et Geolab correspondent aux résidus standardisés de Comp3D. (Cf. cours de topométrie de précision ES2 (24).

5. Covadis

5.1. Fonctionnement global

Covadis est un applicatif pour AutoCAD, développé par la société GEOMEDIA S.A. et regroupe l'ensemble des fonctionnalités suivantes : Topographie ; dessin assisté ; projets de lotissements ; modèle numérique de terrain ; conception 3D ; terrassement multi plates-formes ; projets linéaires (voirie, route) ; réseaux d'assainissement ; réseaux divers ; giratoires et épures de giration ; métrés et bordereaux ; rendu 3D. Nous allons nous concentrer sur la fonction topographie et le module calcul en bloc. Le manuel utilisateur (30) permet d'avoir un aperçu de cette option.

La fonction « Calcul en bloc de réseau » de Covadis permet de réaliser un ajustement de réseau, dans un système local. Trois types de calcul sont possibles :

- « Calcul en XY » : permet un ajustement des coordonnées planimétriques uniquement,
- « Calcul en XY + Z » : permet de calculer les altitudes des stations et des points de la compensation, mais seuls les angles verticaux font l'objet d'une compensation pour le calcul des altitudes.
- « Calcul en XYZ » : les inconnues sont traitées simultanément dans le même système.

Figure 8 : Covadis, © GEOMEDIA S.A.

La procédure de calcul développée dans le manuel d'utilisation permet de mieux comprendre le processus pour arriver aux coordonnées définitives.

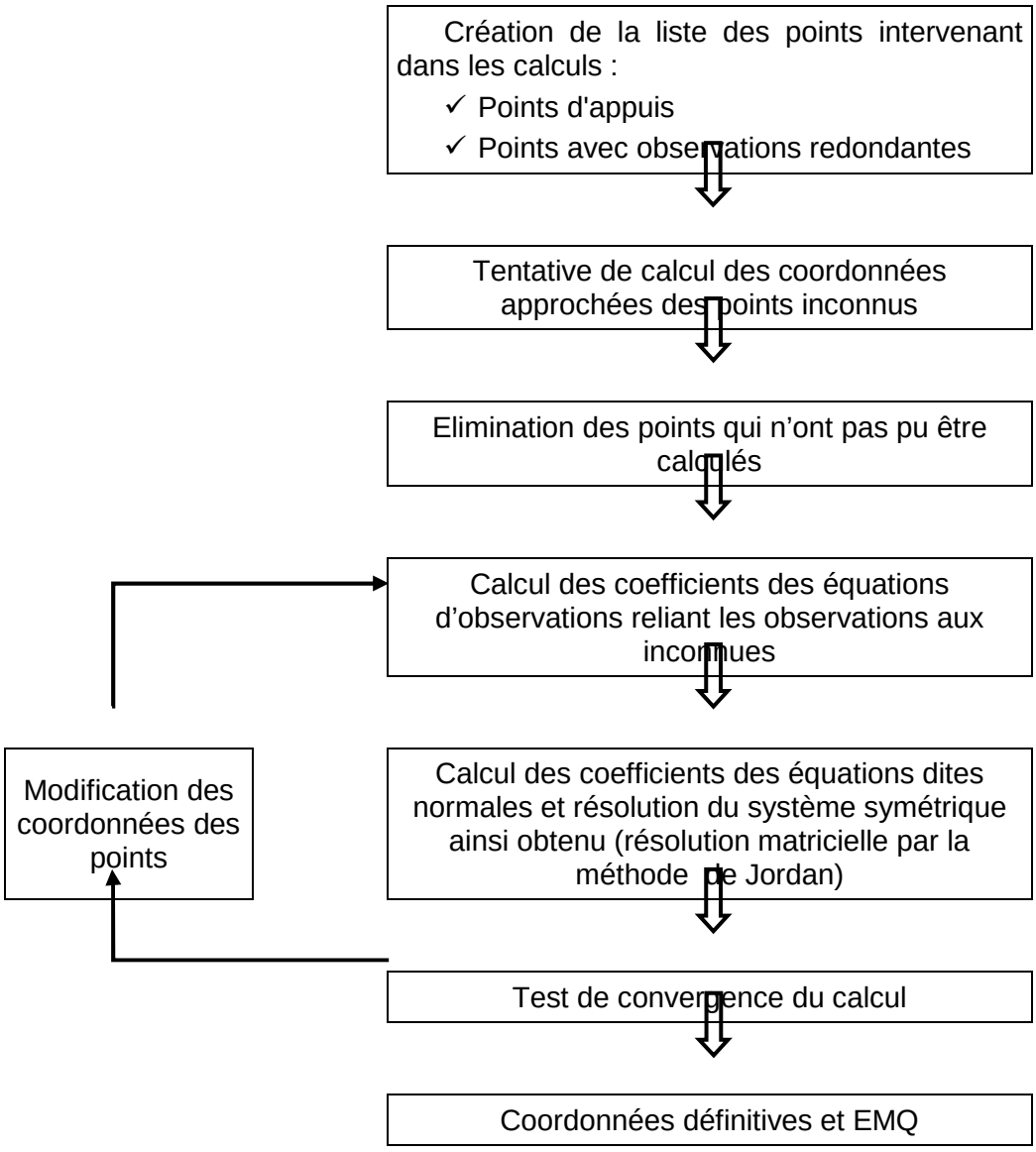

Création de la liste des points intervenant dans les calculs :
✓ Points d'appuis
✓ Points avec observations redondantes
Tentative de calcul des coordonnées approchées des points inconnus
Elimination des points qui n'ont pas pu être calculés
Calcul des coefficients des équations d'observations reliant les observations aux inconnues
Calcul des coefficients des équations dites normales et résolution du système symétrique ainsi obtenu (résolution matricielle par la méthode de Jordan)
Test de convergence du calcul
Modification des coordonnées des points
Coordonnées définitives et EMQ

Figure 9 : Organigramme du principe de calcul en bloc, d'après Covadis Guide de l'utilisateur IV-35, (Clément GUERIN).

Le TFE de Mireille VINCENTI (9) de 2008, permet de conclure que les calculs d'ajustement s'effectuent selon le modèle de terre plate dans le cadre d'un chantier local et si nous travaillons sans projection.

5.2. En entrée

Afin d'effectuer le « Calcul en bloc de réseau », il faut éditer une Géobase qui va comporter les informations sur les stations, les visées, les mesures et la précision de l'appareil. Il faut rentrer les coordonnées des stations connues et en option les coordonnées approchées. Si les coordonnées approchées des points à ajuster sont inconnues, le logiciel les calculera automatiquement, dans le cas où il ne peut les calculer par manque d'observation, il exclura ces points.

Il est important de définir un nouvel appareil qui définit la précision des angles et des distances de l'appareil utilisé sinon pour les calculs le logiciel utilise celles par défaut : 0.005 gr pour les angles, et ± (0.005 m + 5 ppm) pour les distances. Nous pouvons également renseigner les corrections automatiques sur la constante d'addition du prisme et la collimation verticale.

Dans les options, très peu d'informations peuvent être sélectionnées, il y a les paramètres de calcul avec le type de calcul à réaliser et le nombre d'itérations maximum, les points à calculer. Nous pouvons aussi choisir le seuil de probabilité suivant la loi de Fischer (40, 63, et 87%) des ellipses d'incertitude, plus couramment appelées ellipses de confiance.

5.3. En sortie

Lorsqu'on lance un calcul en bloc, via 'Calculs ' → 'Calcul en bloc du réseau', le logiciel peut générer un listing qui a le même non que la GéoBase avec l'extension « cbl » ou « rtf », il est composé de plusieurs informations :

- Observations brutes réduites,
- Coordonnées approchées,
- Résidus sur les observations réduites avant compensation, les observations calculées sont obtenues à partir des coordonnées approchées, cela permet de détecter les fautes et incohérences grossières,
- Coordonnées compensées avec les erreurs moyennes quadratiques sur les inconnues,
- Résidus sur les observations réduites après compensation, les observations calculées sont obtenues à partir des coordonnées compensées,
- Ellipses de confiance selon le plan horizontal (XY)

Partie 2 : Synthèse des possibilités offertes par les différents logiciels

Avant de réaliser des tests plus poussés sur les résultats obtenus par les différents logiciels, il est important de synthétiser les possibilités offertes en termes de :

- Types de coordonnées acceptés en entrée
- Validation des solutions
- Régions de confiance et de fiabilité
- Types de matrices exportables
- Résultats sur les observations
- Résultats sur les coordonnées

Nous proposons de résumer cela sous la forme de tableaux avec une légende commune

Tableau 2 : Légende

✓	Option possible
✗	Option impossible
!	Cas particulier / Peut nécessiter des calculs supplémentaires

A. Types de coordonnées acceptés en entrée

Tableau 3 : Types de coordonnés acceptés en entrée

	Columbus	Geolab	CoMeT	Comp3D	Covadis
Coordonnées locales X,Y,(Z) ou N,E, E ou Up	✓	!	✓	✓	✓
Coodonnées planes selon une projection N,E, E ou Up	✓	✓	✓	!	✓
Coordonnées géocentriques X, Y, Z	✓	✓	✓	✗	✗
Coordonnées géographiques P, L, H ou Up	✓	✓	✓	✗	✗

N, E, E ou Up : Nord, Est, Altitude ou Hauteur ellipsoïdale
P, L, H ou Up : Longitude, Latitude, Altitude ou Hauteur ellipsoïdale,

Le tableau 3 permet de constater que les coordonnées locales sont acceptées par les cinq logiciels. Cependant Geolab traitera seulement les coordonnées planimétriques, il ne prend pas en compte la composante verticale pour un ajustement avec des coordonnées locales.

Pour les coordonnées selon une projection, tous les logiciels les prennent également en compte.
Cependant, Comp3D considère que « toutes les projections sont équivalentes au premier ordre, pour une zone assez petite » (Cf. le manuel de Comp3D (18)). Si on entre des coordonnées selon une projection il les traitera donc indifféremment des coordonnées locales.
Lorsque l'on utilise ces coordonnées avec le logiciel Covadis, celui-ci applique des corrections aux observations brutes qui sont calculées en fonction de la projection et de l'ellipsoïde choisis.

Columbus, Geolab et CoMeT prennent en charge toutes les coordonnées géocentriques et géographiques au contraire de Comp3D et Covadis.

Pour nos tests, il faut utiliser les mêmes types de coordonnées en entrée des différents logiciels afin de pouvoir réaliser correctement des comparaisons. Pour cela nous allons utiliser les coordonnées planes selon une projection pour Columbus, Geolab et CoMeT, et ces mêmes coordonnées planes mais utilisées en local pour Comp3D et Covadis.

B. Validation des solutions

Tableau 4 : Validation des solutions

	Columbus	Geolab	CoMeT	Comp3D	Covadis
Validation individuelle des observations	✓	✓	✓	!	✗
Estimateur du facteur unitaire de variance	✓	✓	✓	!	!

La validation individuelle des observations est réalisable par Columbus, Geolab et CoMeT. Nous pouvons choisir le seuil de rejets des observations. Mais chaque logiciel utilise sa propre méthode pour la validation individuelle des observations. Ainsi Columbus utilise toujours la loi du Tau, CoMeT choisit la loi utilisée en fonction de la validation ou non du test du χ^2. Geolab permet de choisir parmi la loi du Tau, la loi normale et la loi de Student. La loi utilisée va avoir une influence sur les seuils d'acceptation des résidus (validation individuelle des observations).

Comp3D réalise également un test statistique de validation individuelle des observations. Il teste uniquement le rapport du résidu sur la précision de la mesure (ce qu'il appelle résidu standard) :

- Si le »résidu standard » est supérieur à 6, il affichera : "***" à coté de l'observation,
- Si le « résidu standard » est supérieur à 3, il affichera : "*" à coté de l'observation.

En considérant que le « résidu standard » calculé par Comp3D suit théoriquement une loi normale centrée réduite, le choix d'un premier seuil à la valeur 3 correspond à un seuil de probabilité d'environ 99.9 %.

Covadis ne fait aucun test statistique sur les observations, il va seulement signaler les 3 plus gros résidus dans le rapport.

Nous ne pourrons pas nous servir du test de validation individuelle des observations pour les tests de comparaisons car tous les logiciels ne disposent pas de cette option. Mais c'est un atout important pour les logiciels disposant de cette option dans le cadre d'un ajustement de mesures, pour aider à la détection des fautes.

L'estimateur du facteur unitaire de variance est donné par tous les logiciels avec quelques spécificités :

- Columbus, Geolab et CoMeT réalisent le test du χ^2 qui permet une validation globale de l'ajustement.
- Comp3D donne seulement la racine carrée de l'estimateur (Cf. TFE de Sébastien Douche(17)), et aucun test n'est réalisé.
- Covadis affiche une erreur quadratique moyenne générale en grade, sans faire de test.

Nous allons apporter quelques informations sur cette erreur moyenne quadratique générale calculée par Covadis. Grâce aux renseignements de monsieur Pascal Ditgen de Covadis, et au manuel utilisateur, nous avons pu établir que l'erreur quadratique moyenne générale (EMq_0) est calculée à partir de la formule suivante :

$$EMq_0 = \sqrt{\frac{\sum P_k dl_k^2}{n-m}}$$

Avec P_k le poids de l'observation, dl_k résidu de l'observation, n le nombre d'observations et m le nombre d'inconnues.

L'estimateur du facteur unitaire de variance de la méthode des moindres carrés s'obtient quand à lui par la formule :

$$S_0^2 = \frac{V^T P V}{n-m}$$

Avec V la matrice des résidus et P la matrice des poids.

La différence entre ces deux formules réside dans le calcul de la matrice des poids sous Covadis. Ce dernier établit une référence de poids ($P_{standard}$) sur les observations angulaires égale à 1 pour l'appareil standard qui est défini par une précision sur les angles horizontaux et verticaux ($\sigma_{standard}$) de 0.005 grades, et une précision sur les distances inclinées de ± (0.005 mètres + 5 ppm). Pour une précision angulaire (σ_{angu}) différente on aura un poids (P_{angu}) égal à :

$$P_{angu} = \frac{1}{\left(\frac{\sigma_{angu}}{\sigma_{standard}}\right)^2}$$

Sachant que :

$$P_{standard} = 1$$

Par exemple, pour un appareil d'une précision angulaire de 0.0035 grades, on aura un poids de 2,04.

Le poids pour les distances est calculé par rapport à une précision angulaire. La précision renseignée dans les caractéristiques de l'appareil va être convertie en grades en considérant une visée perpendiculaire à la distance.

Ainsi pour une visée de 100 mètres avec un appareil de précision sur les distances inclinées de ± (0.005 mètres + 5 ppm), on aura une précision de :

$$\sigma_{dist} = \frac{0.005 + 100 \times 5 \times 10^{\wedge -6}}{100} \times \frac{200}{\pi} = 0.0035\ grd$$

Le poids sur la distance (P_{dist}) est ensuite obtenu par la relation suivante :

$$P_{dist} = P_{angu} \times \left(\frac{\sigma_{angu}}{\sigma_{dist}}\right)^2 = \frac{1}{\left(\frac{\sigma_{angu}}{\sigma_{standard}}\right)^2} \times \left(\frac{\sigma_{angu}}{\sigma_{dist}}\right)^2 = \frac{1}{\left(\frac{\sigma_{dist}}{\sigma_{standard}}\right)^2}$$

D'où l'inverse de la matrice de variance/covariance a priori sur les observations $\sum_L^{-1}$:

$$P_{covadis} = \sum_{L\,Covadis}^{-1} = {\sigma_{standart}}^2 \times \sum_L^{-1}$$

Avec :

$$\sum_L^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{{\sigma_1}^2} & \cdots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \cdots & \frac{1}{{\sigma_n}^2} \end{bmatrix}$$

J'ai pu ainsi déterminer l'estimateur du facteur unitaire de variance à partir de l'EMq_0 pour le logiciel Covadis :

$$S_0^2 = \frac{V^t PV}{n-m} = \frac{{EMq_0}^2}{{\sigma_{standart}}^2}$$

Nous pourrons ainsi nous servir de la valeur de l'estimateur du facteur unitaire de variance fourni par les différents logiciels comme élément de comparaison dans la suite des tests.

C. Régions de confiance et de fiabilité

Tableau 5 : Régions de confiance et de fiabilité

	Columbus	Geolab	CoMeT	Comp3D	Covadis
Intervalle de confiance	✓	✓	✓	✗	✗
Ellipse de confiance	✓	✓	✓	✗	✓
Ellipsoïde de confiance	✓	✓	✓	✓	✗
Région de fiabilité	✗	✗	✓	✗	✗

1. Régions de confiance

« L'intervalle, l'ellipse ou l'ellipsoïde de confiance d'un point limite respectivement une droite, une zone du plan ou de l'espace dans laquelle le point a la probabilité p de se trouver, p étant le seuil de confiance.» Cf. Cours de topométrie de précisions ES2 (24)

Les intervalles de confiance qui sont couramment utilisés pour étudier la précision altimétrique sont calculés par Columbus, Geolab et CoMeT.

Les ellipses de confiance sont calculées par CoMeT, Geolab, Columbus et Covadis. Chaque logiciel présente des spécificités pour les ellipses de confiance.

Ainsi Covadis ne sort que les ellipses de confiance en planimétrie et propose 3 seuils de confiance, 40%, 63% et 87% ce qui correspond respectivement à 1, 1,5 et 2 sigma suivant la loi de Fischer.

Pour CoMeT, Geolab et Columbus, les seuils des ellipses de confiance sont choisis manuellement. Par ailleurs CoMeT et Columbus proposent deux lois pour le calcul des ellipses de confiance la loi du χ^2 ou la loi de Fischer qui est plus adaptée pour les chantiers avec un degré de liberté moindre.

Les ellipsoïdes de confiance sont calculés par CoMeT, Geolab, Columbus et Comp3D.

Comme pour les ellipses de confiance, CoMeT, Geolab et Columbus permettent de choisir le seuil des ellipsoïdes de confiance. Avec la possibilité pour CoMeT et Columbus d'utiliser deux lois (la loi du χ^2 ou la loi de Fischer).

Comp3D peut calculer les ellipsoïdes avec un seuil fixé à 1 sigma ce qui équivaut à une probabilité de 20%. Cf. Cours de topométrie de précisions ES2 (24)

Columbus propose également d'autres régions de confiance :

- La distance de confiance qui correspond à un estimateur de la précision des distances entre deux points. Elle est calculée à partir des matrices de covariance a posteriori des deux points et la matrice de covariance a posteriori qui corrèle ces points.
- Le cercle de confiance qui est une approximation de l'ellipse de confiance à un rayon constant.

2. Régions de fiabilité

CoMeT propose les rectangles et segments de fiabilité qui permettent d'étudier l'influence des fautes non détectables sur les coordonnées d'un point en 1D, 2D et 3D. Mais d'autres logiciels comme LTOP proposent également ces informations.

Les trois premiers logiciels, Columbus, Geolab et CoMeT sont donc les plus complets en termes de calcul sur les régions de confiance avec la possibilité de faire varier les seuils. A l'inverse Covadis et Comp3D ne proposent qu'un seul estimateur de confiance avec des seuils fixes ce qui restreint l'analyse des résultats.

D. Matrices associées au calcul

Tableau 6 : Matrices associées au calcul

	Columbus	Geolab	CoMeT	Comp3D	Covadis
Matrice N ou N-1	⚠	✓	✓	✓	✗
Matrice du système	✗	✓	✓	✗	✗

Certains logiciels permettent de récupérer en sortie les matrices associées aux calculs par la MMC. Ainsi la matrice normale ou son inverse qui permettent d'échanger des informations entre logiciels est particulièrement intéressante. Dans le cadre du TFE, nous pouvons avoir accès au résumé des informations associées au problème traité pour la comparaison lors des tests.

Les logiciels Geolab, CoMeT, Comp3D donnent directement la matrice normale ou son inverse.

Attention, Comp3D peut générer la matrice normale inverse seulement si l'option d'inversion de la matrice normale est cochée.

Pour Columbus, nous disposons des matrices de variances sur les coordonnées ajustées, ce qui permet de déduire la matrice N^{-1}.

Par contre Covadis ne nous donne aucune information sur cette matrice.

D'autres matrices sont générées lors des calculs et le logiciel CoMeT permet de visualiser les matrices A, B et P pour un système AX=B+e avec P la matrice des poids, mais aussi les vecteurs résidus et solutions (V et X).

Les misclosures fournis par Geolab permettent également de reconstruire la matrice B. (Cf. Partie 1.B.1.3)

Les matrices associées au système des moindres carrés n'étant fournies que par CoMeT et Geolab, il ne sera pas possible de s'en servir comme élément de comparaison entre les logiciels.

E. Informations sur les observations

Tableau 7 : Informations sur les observations

	Columbus	Geolab	CoMeT	Comp3D	Covadis
Observations mesurées	✓	✓	✓	!	✓
Observations calculées	✓	✓	✓	!	✓
Résidu	✓	✓	✓	✓	✓
Résidu standardisé et/ou normé	✓	✓	✓	!	✗
Précision a priori sur l'observation	✓	✓	✓	✓	!
Précision a posteriori sur le résidu	✓	✓	✓	✗	✗
Redondance	✓	✗	✗	✓	✗

Ces données permettent de visualiser les erreurs sur les observations et ainsi de détecter les fautes. Tous les logiciels affichent les valeurs mesurées des observations ainsi que leurs valeurs théoriques calculées à partir des coordonnées ajustées. Tous fournissent également les résidus sur les mesures.

Les informations sur les résidus normés sont données par Columbus, Geolab, et CoMeT. Avec ces logiciels ils sont calculés par le rapport entre le résidu et la précision a posteriori sur le résidu.

Attention, les résidus normés ne sont pas calculés de la même manière pour Comp3D. Cela dépendra de l'option « inversion de la matrice normale ». Nous aurons les résidus standards et la redondance s'il y a inversion, sinon, nous aurons seulement les résidus normés. (Cf. Partie 1-B-4.3)

Columbus donne également la redondance des informations, cela renseigne sur l'utilité de l'observation.

Les précisions a priori sur les observations sont données par tous les logiciels.

Cependant Covadis donnera le poids des observations et non la précision a priori, ce poids étant calculé de façon spécifique comme indiqué précédemment.

Columbus, Geolab et CoMeT sont les seuls à afficher les précisions a posteriori sur les résidus.

F. Informations sur les solutions

Tableau 8 : Informations sur les solutions

	Columbus	Geolab	CoMeT	Comp3D	Covadis
Coordonnées intermédiaires	✗	✓	✓	✗	✗
Coordonnées finales	✓	✓	✓	✓	✓
Précision des coordonnées finales	✓	✓	✓	✓	✓
Différence entre coordonnées initiales et finales	✓	✓	✓	✓	!

Les coordonnées intermédiaires sont fournies par Geolab et CoMeT, ce qui permet de visualiser l'évolution des coordonnées des points au cours de l'ajustement à chaque itération.

Tous les logiciels fournissent les coordonnées finales dans le système de coordonnée d'entrée, avec les précisions sur ces coordonnées. A noter que Columbus, Geolab et CoMeT peuvent afficher les coordonnées finales selon différents systèmes de coordonnées (cartésiennes géocentriques, ellipsoïdales, ou coordonnées planes).

Les différences entre les coordonnées finales et initiales sont données dans les rapports mais pour Covadis il faut les calculer manuellement.

Pour la suite de l'étude, c'est un résultat intéressant car il permet de visualiser l'écart entre les coordonnées initiales et les coordonnées ajustées.

A partir de cette première comparaison, nous constatons que chaque logiciel a ses propres caractéristiques et qu'ils ne donnent pas tous les mêmes informations. Nous pouvons ainsi établir les critères pour les tests :

- Utilisation des coordonnées planes selon une projection
- Comparaison des coordonnées finales
- Comparaison du facteur unitaire de variance.

Partie 3 : Test de l'influence de la taille du chantier

Dans les manuels d'utilisation ou la documentation technique des programmes, nous avons pu lire des mises en garde sur les limites d'utilisation de ces logiciels concernant l'étendue des chantiers. Ainsi dans le manuel utilisateur de Columbus, il est précisé que pour les ajustements « en local », la dimension du chantier ne doit pas excéder un kilomètre carré. Comp3D qui est défini comme un logiciel de compensation de micro-géodésie précise dans son manuel, je cite : « permet de calculer un réseau peu étendu (quelques kilomètres) ». Nous savons également qu'il existe des limites pour Covadis qui traite les données selon un modèle de terre plate.

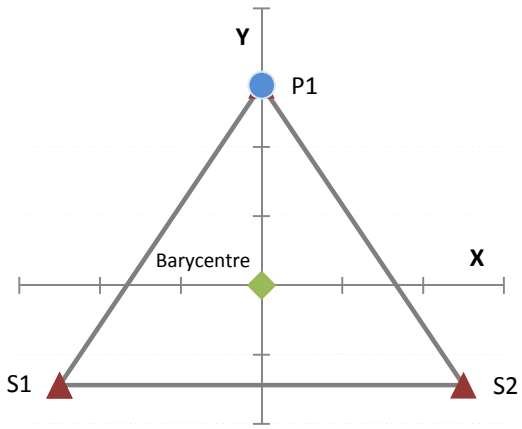
L'objectif principal de cette partie du mémoire est d'étudier le comportement des logiciels en fonction de la dimension du réseau et d'établir les limites d'utilisation des logiciels de façon plus précise.

A. Présentation du réseau

Pour ce test, la problématique est l'augmentation de la taille du chantier, pour cela nous avons choisi un réseau sous la forme d'un triangle équilatéral, avec deux stations connues en coordonnées, S1 et S2, et un point à ajuster, P1. Le triangle équilatéral a la particularité d'avoir ses trois cotés de même longueur, ce qui permet dans notre cas d'étudier une dimension de chantier, *d*, spécifique à chaque réseau créé. L'augmentation de la taille du réseau influe donc sur les coordonnées.

Nous avons choisi de créer différents réseaux à partir du barycentre du triangle équilatéral. Connaissant les propriétés du barycentre, nous avons établi les équations des coordonnées des points en fonction de la distance testée. (Voir Figure 10). Par ailleurs, le barycentre sera la latitude moyenne des réseaux et il sera identique pour tous les réseaux.

Schéma du réseau



Equations des coordonnées des points :

$$\begin{cases} X_{P1} = X_{Barycentre} \\ Y_{P1} = \frac{2}{3} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times d + Y_{Barycentre} \end{cases}$$

$$\begin{cases} X_{S1} = -\frac{1}{2} \times d + X_{Barycentre} \\ Y_{S1} = -\frac{1}{3} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times d + Y_{Barycentre} \end{cases}$$

$$\begin{cases} X_{S2} = \frac{1}{2} \times d + X_{Barycentre} \\ Y_{S2} = -\frac{1}{3} \times \frac{\sqrt{3}}{2} \times d + Y_{Barycentre} \end{cases}$$

d : dimension du réseau.

Figure 10 : Schéma du réseau et équations des coordonnées des points

L'analyse des coordonnées prises en entrée par chaque logiciel dans la partie II.A a permis de déterminer que nous pouvions travailler avec des coordonnées planes selon une projection. Pour ce réseau, nous allons donc travailler dans la projection Lambert Zone CC48 et utiliser l'ellipsoïde IAG GRS 80.

B. Génération des mesures

Une fois les coordonnées des points déterminées pour chaque réseau, il faut des mesures.

Pour ce réseau nous allons utiliser des mesures de distances suivant la pente, de distances zénithales et de lectures horizontales. Les deux stations (S1 et S2) se visent réciproquement et visent le point P1.

Comme il est impossible d'effectuer sur le terrain l'ensemble des mesures nécessaires à nos tests, nous allons générer ces mesures suivant un modèle particulier à partir du logiciel CoMeT.

Pour générer ces mesures sur CoMeT, il faut disposer des coordonnées des points du réseau simulé (Cf. formules de la Figure 10) et préciser les mesures que nous souhaitons réaliser, ainsi que les précisions sur les observations.

Pour chaque observation, CoMeT génère une valeur observée qui correspond à la valeur théorique de la mesure (fonction des coordonnées du point stationné et du point visé) additionnée d'un bruit blanc gaussien dont l'écart-type correspond à la précision a priori associée à la mesure.

Générer des mesures à partir d'un logiciel et comparer les résultats obtenus avec les autres logiciels aura des répercutions sur l'ajustement. Ainsi le logiciel qui génère les observations aura un facteur unitaire de variance proche de 1, les mesures générées collant naturellement aux valeurs théoriques. Mais nous cherchons avant tout, dans ce test, la limite des logiciels qui utilisent un modèle « Terre plate » ou « Terre sphérique ». Pour cela il faut avoir des observations les plus proches de la réalité. CoMeT est le plus à même de le faire, il est le seul à disposer de cette option. Il va générer les mesures selon une « Terre ellipsoïdale » qui se rapproche le plus du modèle "réel" de la Terre.

Par ailleurs en générant des mesures avec CoMeT, nous pourrons valider le logiciel en le comparant avec Columbus et Geolab qui modélise suivant le même principe. Si nous constatons des écarts récurrents entre ces deux logiciels et CoMeT, nous pourrons soupçonner une erreur de modélisation dans ce dernier.

C. Les fichiers du test

1. Les fichiers d'observations

En utilisant son option de génération de mesures, CoMeT fournit directement un fichier au format Geolab exploitable par lui-même mais également par Geolab.

Une fois les fichiers « .iob » générés, il a fallu créer les fichiers pour les autres logiciels. Pour cela il faut respecter le format de chaque fichier d'entrée, nous avons ainsi créé les fichiers « .OBS » et « .COR » pour Comp3D, les géobases pour Covadis et les fichiers « .txt » pour Columbus.

Nous avons effectué ce travail pour un ensemble de réseaux avec les tailles suivantes : 10 ; 100 ; 200 ; 300 ; 400 ; 500 ; 600 ; 700 ; 800 ; 900 ; 1000 ; 1250 ; 1500 ; 1750 ; 2000 ; 5000 ; 10000 ; 25000 ; 50000 mètres.

2. Les fichiers de configurations

Ensuite il faut adapter la configuration de chaque logiciel pour qu'ils utilisent tous les mêmes paramètres de traitement, afin de s'assurer que les écarts constatés sur les résultats sont bien liés à des différences de traitement et non à des différences dans le choix des options. Nous avons donc

configuré les différents logiciels avec les mêmes options de traitement, sans forcément prendre en compte tous les raffinements proposés par certains.

Ces fichiers configurations seront identiques pour toutes les dimensions de réseau.

Les précisions des mesures sont renseignées avec :

- une précision pour les angles horizontaux et verticaux de 0.0035 grades.
- une précision de ± (0,0007 mètres + 2 ppm) pour les distances suivant la pente.

Comp3D impose par contre de donner une précision pour les coordonnées connues, nous avons donc indiqué une précision de 0,00001 mètre sur les trois composantes, pour être en accord avec les autres programmes (i.e. point fixé en coordonnées 3D).

Covadis ne prend pas en compte les erreurs de centrage ainsi que la correction de la réfraction. Nous ne tenons pas compte de ces possibilités proposées par CoMeT, Geolab, Columbus et Comp3D.

Pour les logiciels Columbus, CoMeT et Geolab, nous pouvons régler le nombre maximum d'itérations (30), le critère de convergence (0,0001 mètre) et les seuils de confiance (95%).
Covadis permet seulement de gérer le nombre maximum d'itérations (30), et les seuils pour les ellipses de confiances (87%).
Comp3D ne permet aucune de ces options (seuil par défaut des ellipsoïdes de 20%).

Le choix des seuils des régions de confiance n'a pas d'importance pour nos tests car nous ne nous attarderons pas sur ces critères. Par ailleurs, le nombre d'itération sélectionné en option pour chaque logiciel est le maximum afin d'assurer la convergence des solutions. En revanche, le critère de converge peut influer sur les calculs. Dans notre cas, nous avons choisi de mettre 0,0001 mètre, car c'est souvent la précision recherchée en auscultation.

Pour Columbus en mode local et Comp3D, il faut renseigner la latitude moyenne du chantier qui est identique pour tous les chantiers et vaut N 48°01'07".

Une fois les fichiers d'observations et de configuration créés, nous pouvons réaliser les calculs d'ajustement des réseaux, et enregistrer les rapports de calculs.

D. Résultats

1. Déplacement du point ajusté

Nous avons choisi délibérément de nous intéresser de manière séparée aux composantes planimétriques et à la composante verticale, comme cela est généralement le cas en topographie.
Les figures 11 et 12 qui suivent illustrent la distance planimétrique entre les coordonnées ajustées du point P1 et ses coordonnées considérées comme vraies, obtenues par les formules de la figure 10, détail des séries de données en Annexe 1. Les figures 13 et 14 illustrent l'écart entre la composante verticale ajustée et la vraie, détail des séries de données en Annexe 2.

Ainsi, si $(x_{P1},\ y_{P1},\ z_{P1})$ représentent les coordonnées ajustées du point P1 et $(x'_{P1},\ y'_{P1},\ z'_{P1})$ ses coordonnées théoriques (vraies) on a :

- la distance planimétrique : $D_{plani} = \sqrt{(x'_{P1} - x_{P1})^2 + (y'_{P1} - y_{P1})^2}$
- l'écart sur la composante verticale : $\Delta_{verti} = z'_{P1} - z_{P1}$

1.1. Distance planimétrique

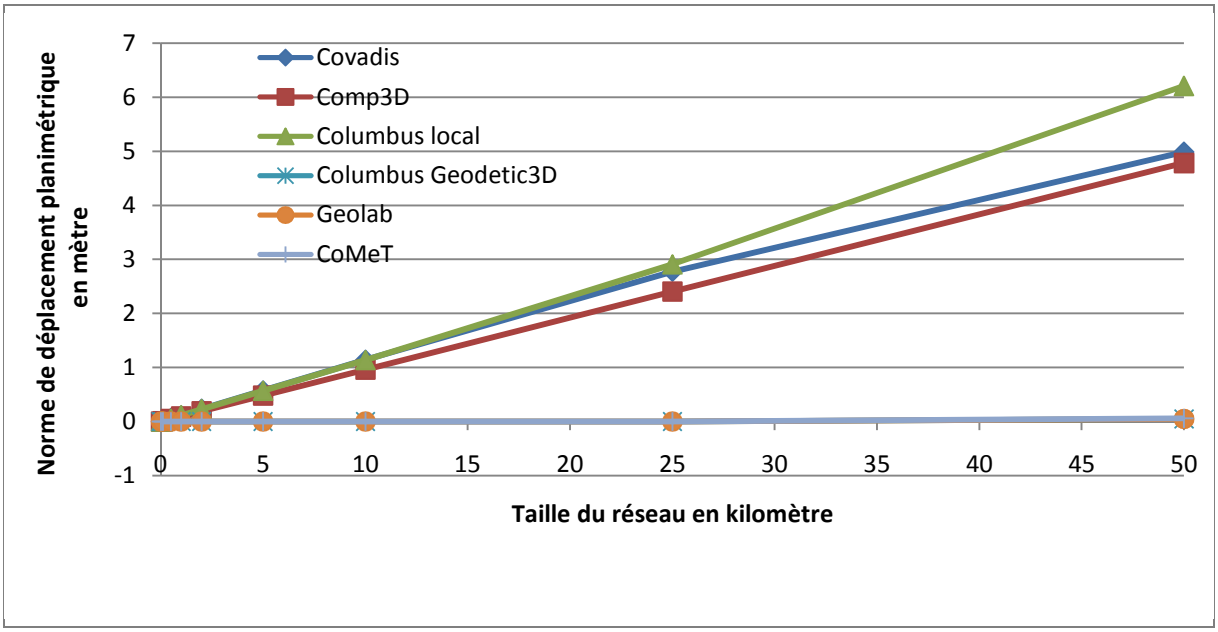


Figure 11 : Distance planimétrique du point P1 en fonction de la taille du réseau et du logiciel

La distance planimétrique du point P1 en fonction de la taille du réseau et du logiciel (Figure 11) permet de dégager les premières tendances (réseaux de 10 mètres à 50 kilomètres). Le détail des séries de données est disponible en Annexe 1.

Deux familles de logiciels se dégagent : d'un côté Covadis, Comp3D et Columbus local, et de l'autre CoMeT, Columbus 3D Geodetic et Geolab.

Si on calcule le coefficient de corrélation des séries de valeurs de distances planimétriques obtenues par ces trois derniers logiciels, on constate une corrélation de 0,999. Cela confirme que Geolab et Colombus 3D Geodetic utilisent bien le même principe de modélisation (« Terre ellipsoïdale ») que CoMeT avec lequel nous avons généré les mesures.

Pour les logiciels Covadis, Comp3D, et Columbus local, l'évolution de la distance planimétrique en fonction de la taille du réseau est similaire. Mais il y a des écarts de distance planimétrique entre la valeur vraie et la valeur ajustée de l'ordre de 50 centimètres pour les réseaux de 5 km et de 1 mètre pour les réseaux de 10 km.

Conformément aux prescriptions, ces logiciels ne sont donc pas adaptés pour des réseaux de grande envergure.

En revanche, on observe peu de différence entre les deux catégories de modélisation « Terre plate » et « Terre sphérique ». Les coefficients de corrélations entre les séries de valeurs de ces logiciels sont de 1 pour des réseaux de 0 à 5 kilomètres. Pour ces dimensions de réseaux ils sont donc équivalents.

Nous nous concentrons maintenant sur la distance planimétrique du point P1 pour les réseaux de 10 mètres à 2 kilomètres, afin de déterminer la limite d'utilisation des logiciels (Figure 12). Le détail des séries de données est disponible en Annexe 1.

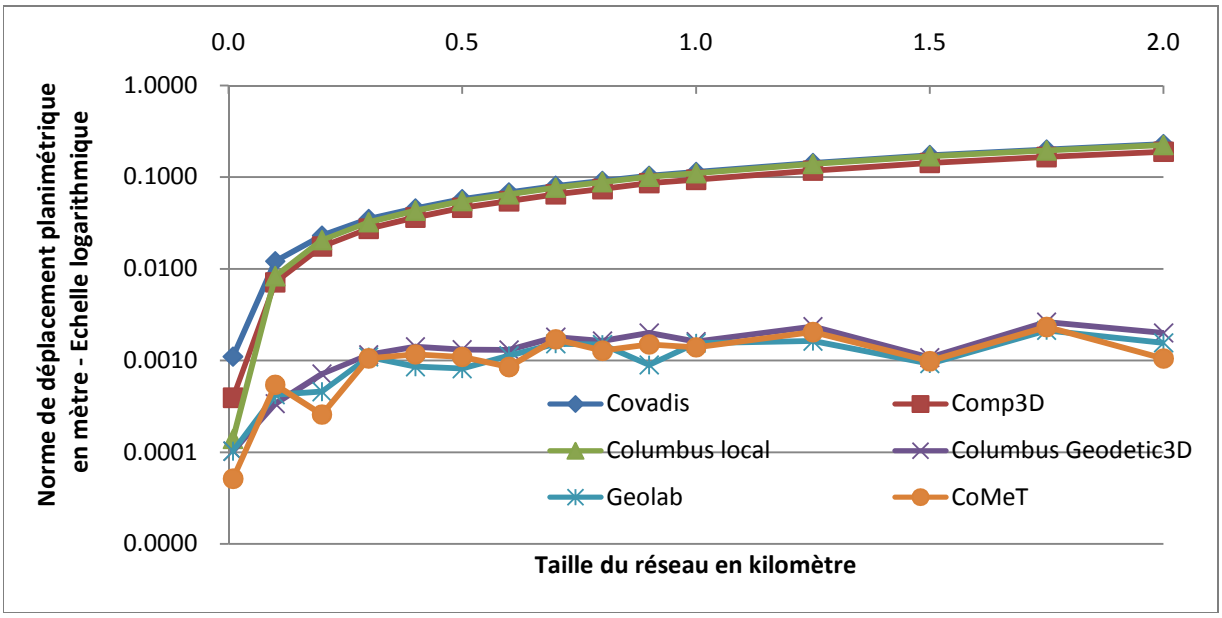


Figure 12 : Distance planimétrique du point P1 en fonction de la taille du réseau et du logiciel - Zoom sur les réseaux de 0 à 2 km - Echelle logarithmique

Les deux familles de logiciels de la Figure 11 sont toujours visibles dans la Figure 12.

Nous retrouvons d'un coté les logiciels Covadis, Comp3d et Columbus local, et de l'autre CoMeT, Columbus 3D Geodetic et Geolab.

Pour un réseau de 10 mètres d'étendue, la distance planimétrique (entre coordonnée ajustée et coordonnées vraie) pour Covadis est de 1 millimètre, alors que pour Comp3d et Columbus local elle est de l'ordre de 10^{-4} mètre.

Pour un réseau de 100 mètres, la distance planimétrique pour Covadis est de 1 centimètre, tandis que pour Columbus local et Comp3D, elle est de l'ordre de 8 millimètres.

Pour les réseaux de 500 mètres à 2 kilomètres, les distances planimétriques pour Covadis et Columbus sont du même ordre de grandeur et continuent à augmenter, elles vont de 5,5 centimètres à 22 centimètres. Comp3D donne des résultats avec des distances de 4,5 centimètres (à 500 m) à 19 centimètres (à 2km).

1.2. Écart sur les composantes verticales

L'évolution du déplacement vertical du point P1 en fonction de la taille du réseau (de 10 mètres à 50 kilomètres) et du logiciel (Figure 13) permet de mettre en avant une importante différence du logiciel Covadis pour les réseaux supérieurs à 1 kilomètre d'étendue par rapport aux autres logiciels. Le détail des séries de données est disponible en Annexe 2.

Le modèle « Terre plate » utilisé par Covadis dégrade rapidement l'ajustement vertical. Nous observons un déplacement de 1 centimètre par rapport à la valeur vraie pour un réseau de 1 kilomètre. Ce modèle n'est donc pas adéquat pour des réseaux supérieurs à 1 kilomètre.

Le déplacement vertical pour les logiciels CoMeT, Columbus 3D Geodetic et Geolab est similaire pour les réseaux de 1 à 50 kilomètres. Nous observons des coefficients de corrélation sur les séries de valeurs de la composante verticale de 0,999 entre ces logiciels.

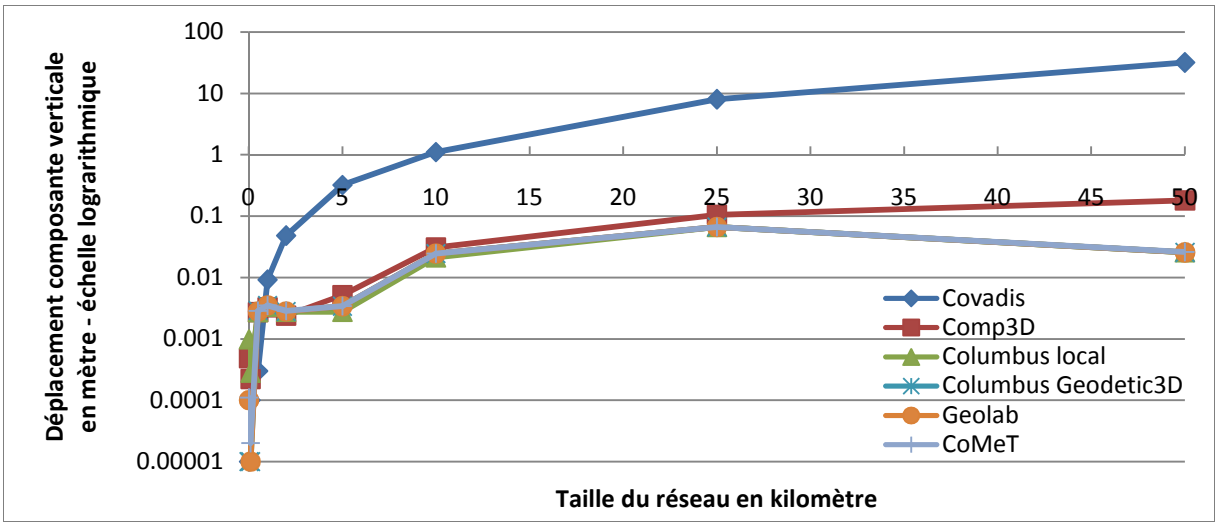


Figure 13 : Déplacement vertical du point P1 en fonction de la taille du réseau et du logiciel

Par ailleurs pour Columbus local, qui fonctionne selon un modèle « Terre plate », on obtient les mêmes valeurs suivant la composante verticale que les logiciels de modélisation « Terre ellipsoïdale ». Les coefficients de corrélation des séries de valeurs de déplacement verticale sont de l'ordre de 0,98 entre Columbus local et ces logiciels. Or pour utiliser le mode local de Columbus, il faut renseigner la latitude moyenne du réseau. Nous pouvons donc supposer au vue des résultats ci-dessus que Columbus local applique une correction de la courbure terrestre. Cette hypothèse est à confirmer en réalisant des tests supplémentaires.

Comp3D a un déplacement de la composante verticale qui augmente progressivement par rapport à ce groupe de logiciels à partir des réseaux d'étendue supérieure à 2 kilomètres. Il y a un écart de déplacement vertical par rapport au groupe de logiciels de 2,5 millimètres pour un réseau de 5 kilomètres et de 10 millimètres pour un réseau de 10 km. Les coefficients de corrélation des séries de valeurs de déplacement verticale entre les logiciels de type « Terre ellipsoïdale » et Comp3D sont de 0,4 pour des réseaux de 2 à 50 kilomètres.

Comp3D considère la « Terre sphérique », cette modélisation a donc des répercutions significatives sur l'ajustement vertical pour des réseaux d'étendue supérieure à 2 kilomètre dans nos simulations.

Nous nous concentrons maintenant sur l'évolution du déplacement vertical du point P1 en fonction de la taille du réseau et du logiciel pour les réseaux de 10 mètres à 2 kilomètres (Figure 14).

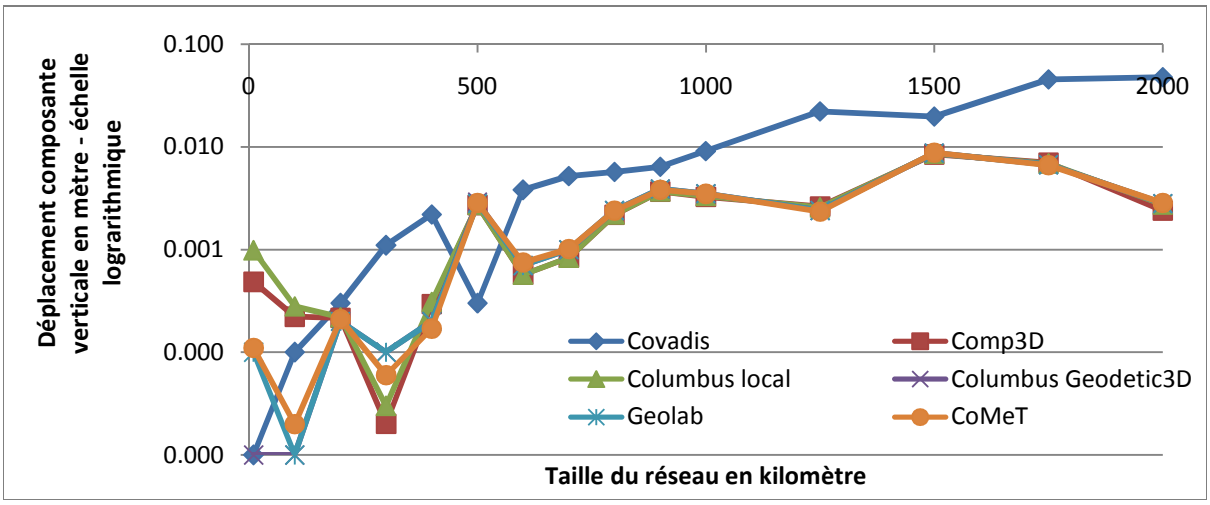


Figure 14 : Déplacement vertical du point P1 en fonction de la taille du réseau et du logiciel - Zoom sur les réseaux de 0 à 2 km

A partir de ce graphique, nous pouvons confirmer la similitude pour CoMeT, Geolab, Columbus 3D Geodetic et Columbus local pour l'ajustement de la composante verticale.

Nous constatons également que le déplacement vertical du point P1 avec Comp3D pour ces dimensions de réseau est similaire à ce groupe de logiciels. Les coefficients de corrélation des séries de valeurs de déplacement vertical entre Comp3D et ces logiciels (hors Covadis) sont de 0,9 pour des réseaux de 0 à 2 kilomètres. Cela permet de conclure que le modèle « Terre sphérique » est équivalent pour un ajustement vertical pour des réseaux de 0 à 2 kilomètres au modèle « Terre ellipsoïdale ».

Nous pouvons aussi confirmer pour Covadis, qui utilise une modélisation « Terre plate », que la composante verticale se dégrade de plus en plus quand l'étendue du chantier augmente.

2. Estimateur du facteur unitaire de variance

L'estimateur du facteur unitaire de variance est calculé à partir des résidus obtenus par la différence entre la mesure observée et la mesure calculée à partir des coordonnées ajustées. Il permet donc de se rendre compte de l'écart de modélisation du logiciel par rapport à la mesure.

Ici la mesure étant générée par le logiciel CoMeT, si nous n'observons aucun écart de la valeur de l'estimateur du facteur unitaire de variance par rapport aux logiciels Columbus et Geolab, nous pourrons valider le calcul « Terre ellipsoïdale » de CoMeT.

Pour les logiciels qui utilisent un modèle « Terre sphérique » ou « Terre plate », nous pourrons étudier l'évolution de la valeur de l'estimateur du facteur unitaire de variance avec la taille du réseau, ce qui permet de déterminer à partir de quelle étendue les logiciels atteignent leur limite en termes de modélisation.

Nous nous intéresserons dans un premier temps aux logiciels d'ajustement Columbus 3D Geodetic, Geolab et CoMeT.

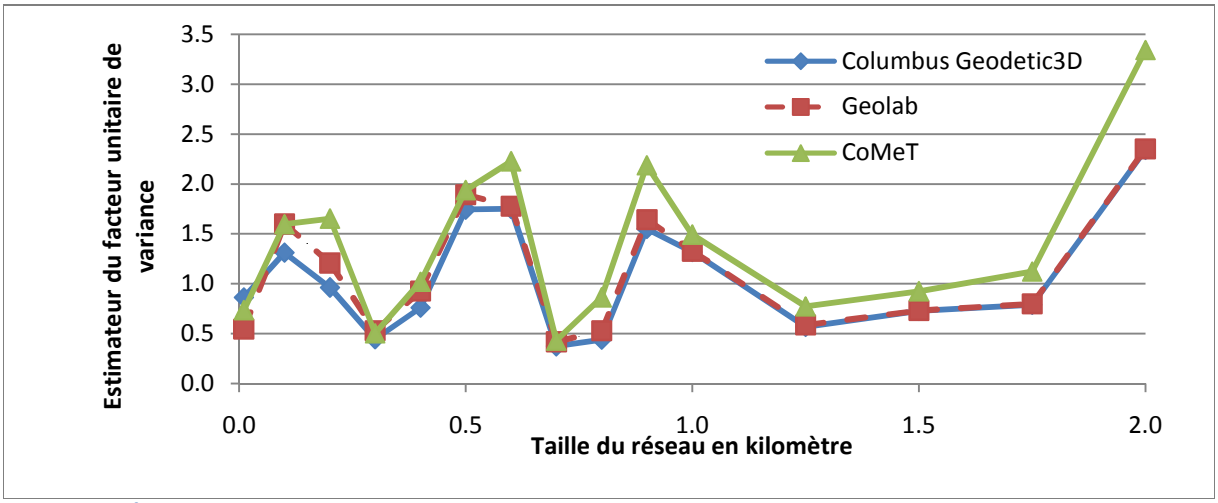


Figure 15 : Évolution de l'estimateur du facteur unitaire de variance en fonction de la taille du réseau pour les logiciels Columbus 3D Geodetic, Geolab et CoMeT

L'évolution de la valeur de l'estimateur du facteur unitaire de variance en fonction de la taille du réseau pour les logiciels Columbus 3D Geodetic, Geolab et CoMeT, est similaire et varie de 0,5 à 3,5 (Figure 15). Le détail des séries de données est disponible en Annexe 3.

A noter cependant que CoMeT présente des écarts par rapport aux deux autres logiciels par exemple pour le réseau de 2 km. Une analyse plus détaillée s'avère donc nécessaire afin de vérifier si cela ne viendrait pas d'un bug dans CoMeT.

Malgré cela, nous pouvons au vu de ces résultats confirmer le bon fonctionnement de CoMeT dans le cas général.

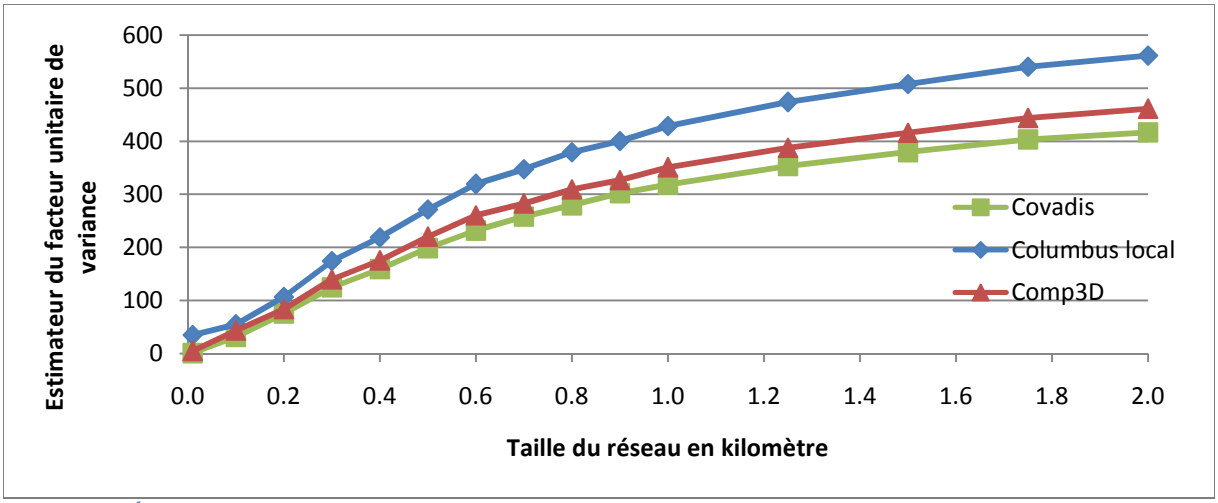


Figure 16 : Évolution de l'estimateur du facteur unitaire de variance en fonction de la taille du réseau pour les logiciels Columbus local, Comp3D et Covadis

L'évolution de l'estimateur du facteur unitaire de variance en fonction de la taille du réseau pour les logiciels Columbus local, Comp3D et Covadis (Figure 16) permet de constater qu'il n'y a pas d'écart significatif entre les logiciels. Le détail des séries de données est disponible en Annexe 3.

Pour les réseaux de 10 mètres à 2 kilomètres, nous observons une augmentation rapide de l'estimateur. Il passe de 30 à 600 pour Columbus local et de 1 à 450 pour Covadis et Comp3D.

Pour les réseaux de plus grande étendue, il évolue de manière moins significative mais reste important.

Les modèles « Terre plate » et « Terre sphérique » présentent donc un écart significatif de modélisation par rapport au modèle « Terre ellipsoïdale » pour des réseaux supérieurs à 100 mètres dans le cadre de cette simulation.

Nous pouvons aussi conclure que le mode « Terre sphèrique » proposé par Comp3D n'apporte pas de modification concrète par rapport à Covadis et Columbus local, en tout cas dans nos simultations.

E. Bilan

En conclusion de ce test, nous constatons que les logiciels Columbus 3D Geodetic, CoMeT et Geolab qui modélisent selon un modèle de « Terre ellipsoïdale », sont adaptés pour toutes les tailles de chantiers.

Nous validons également de manière globale la version actuelle de CoMeT pour l'ajustement de type «Terre ellipsoïdale », même si des tests plus approfondis mériteraient d'être menés (réseau de 2km).

À partir de réseaux de 100 mètres, pour Covadis, Comp3D et Columbus local, on constate des écarts par rapport aux coordonnées vraies supérieurs à 1 centimètre en planimétrie. Ce test tend donc à démontrer que les prescriptions des manuels utilisateurs de Columbus (local) et Comp3D sont trop optimistes quant à la limite d'utilisation de ces logiciels. On confirme également que Covadis est limité à des réseaux d'une centaine de mètre dans le cadre de nos simulations.

En revanche, nous confirmons que la prise en compte de la courbure terrestre permet de traiter l'altimétrie de manière identique à la modélisation ellipsoïdale pour les réseaux de 0 à 2 km pour Comp3D et Columbus local.

Ces résultats sont valables dans le cadre de notre réseau de simulation mais sont à confirmer par une étude plus poussée ou avec des données réelles.

Partie 4 : Comparaison sur deux jeux de données réelles

A partir de ce test théorique avec des données générées, nous avons analysé les limites des logiciels Comp3D, Geolab, CoMeT, Covadis et Columbus local sur des réseaux de grande étendue. Il est donc intéressant de se concentrer sur des réseaux plus complexes de plus faible envergure avec plus d'observations et des données réelles. Nous allons dans ce chapitre réaliser des tests sur les logiciels avec deux jeux de données réelles.

Le but de ces tests est de réaliser des ajustements sur des réseaux réels et de comparer en sortie les résultats de chaque logiciel et les différences obtenues pour des réseaux de faible étendue avec des configurations différentes. Nous allons ainsi effectuer deux tests avec deux réseaux de 50 mètres et 100 mètres avec plus de points à ajuster et des contraintes géométriques et environnementales différentes.

A. Présentation des données et du test

Ces réseaux peuvent contenir des erreurs et la précision a priori des observations peut être mal choisie. Mais nous voulons avant tout comparer les résultats obtenus avec chaque logiciel. Nous ne cherchons pas à déterminer la qualité et les erreurs des réseaux.

1. Les données de Reykjanes

Les données sont issues d'une campagne d'observations géodésiques et sismologiques réalisée en 2005 en Islande dans le cadre d'une étude de déformations géologiques et volcaniques dans la péninsule de Reykjanes au sud-est de l'île. Cette mission a été menée conjointement par le L2G et le LGRMP (Laboratoire de Géodynamique des Rifts et des Marges Passives).

Nous étudions un réseau établi à l'occasion de cette mission (Figure 17). Ce réseau de dimension d'environ 30 x 100 mètres carrés est composé de 6 points, C1 à C6, qui ont été répartis de part et d'autre d'une faille pour étudier les déformations. Les points C1, C3 et C5 ont été déterminés par des mesures GPS et ils ont été ensuite stationnés par tachéomètre. Seulement les points C1 et C3 sont considérés comme des points fixes pour l'ajustement. Les points C2, C4, C5 et C6 seront à ajuster.

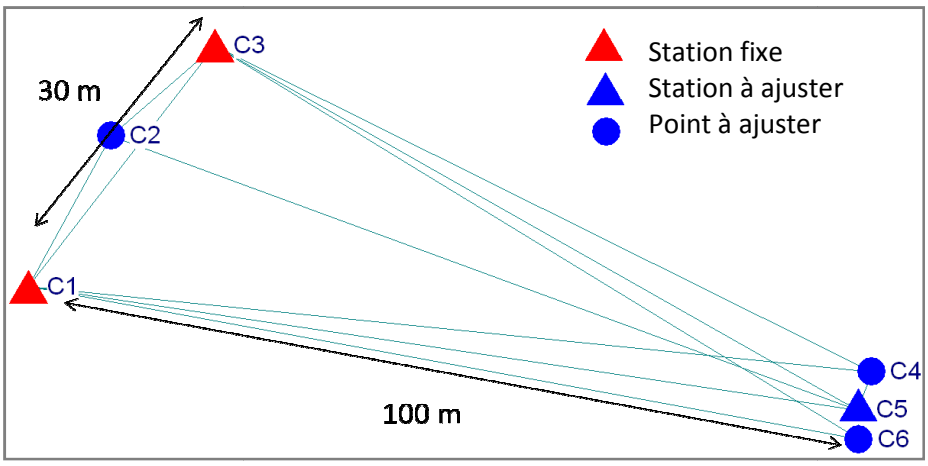


Figure 17 : Plan du réseau de Reykjanes obtenu avec le logiciel Columbus

Dans un premier temps, il y a eu un étalonnage des prismes puis des tours d'horizons ont été réalisés depuis les 3 stations l'un après l'autre, et nous avons récupéré les mesures d'angles horizontaux et verticaux, ainsi que les mesures de distances sur l'ensemble des autres points.

Pour ce réseau, nous allons donc travailler dans la projection Lambert Conique Conforme ISN93 officielle liée à l'Islande et utiliser l'ellipsoïde IAG GRS 80.

2. Les données de la salle de métrologie

Nous avons obtenu les données à l'issue de travaux pratiques réalisés en deuxième année dans la salle de métrologie de l'ESGT. Au cours de ces travaux pratiques, un étalonnage des prismes est réalisé pour déterminer la constante d'addition et le facteur d'échelle, nous prenons également en compte les corrections atmosphériques d'usages.

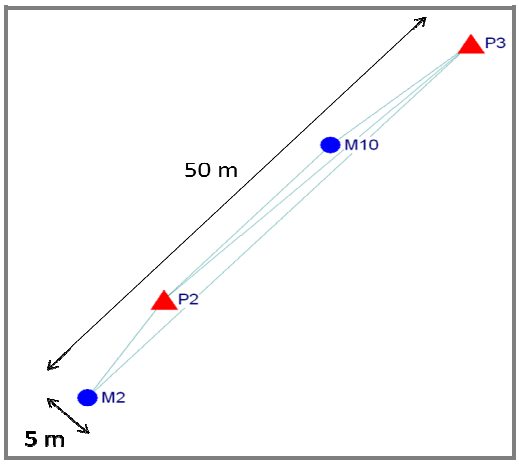


Figure 18 : Plan du réseau de la salle de métrologie obtenu avec le logiciel Columbus

Le réseau (Figure 18) de dimension 5x50 mètres carrés est constitué de 4 points (M2, M10, P2 et P3). Deux points ont été stationnés et seront considérés comme points fixes dans notre ajustement (P2 et P3). Sur chaque station est effectué 4 tours d'horizon qui sont ensuite traités, (correction des paramètres météo, moyenne des tours d'horizon, constante d'addition), puis moyennés. Nous avons directement récupérés le fichier «.iob » des données après traitement. Ce fichier a été ensuite transcrit sous les formats adéquats à chaque logiciel.

Pour ce réseau, nous allons donc travailler dans la projection Lambert 93 et utiliser l'ellipsoïde IAG GRS 80.

B. Mise en œuvre du test

La procédure de test est similaire à celle présentée dans la partie 2. Ici les données ne sont pas générées par CoMeT, mais issues de campagnes de mesures réelles.

Les précisions des mesures pour le réseau de Reykjanes sont de 0,0035 grades pour les angles verticaux et horizontaux et de ± (0,0007 millimètres + 2 ppm) pour les distances.

Pour le réseau de la salle de métrologie elles sont de 0.004 grades pour les angles verticaux, de 0,015 grades pour les angles horizontaux et de ± (0.001 millimètre + 1 ppm) pour les distances.

Les fichiers de configuration sont identiques à ceux utilisés pour le test de l'influence de la taille du réseau (voir Partie III.B.2), sauf pour la latitude moyenne du réseau de Reykjanes : N 63°51'28''.

C. Présentation des résultats

Dans un premier temps nous allons étudier l'estimateur du facteur unitaire de variance, il va nous permettre de regarder de manière globale les écarts entre les mesures et leur modélisation. Ensuite nous étudierons les coordonnées finales de l'ajustement pour voir les différences entre les logiciels.

Pour le réseau de Reykjanes, CoMeT présentent quelques incertitudes, il faut 13 itérations pour résoudre le système des moindres carrés, quand les autres logiciels en prennent 3. Un bug semble être présent et est en cours de débogage. Nous ne rentrerons pas plus dans les détails pour l'ajustement du réseau de Reykjanes avec CoMeT.

1. Estimateur du facteur unitaire de variance

L'estimateur du facteur unitaire de variance permet de quantifier de manière globale la justesse des équations d'observation utilisées par chaque logiciel par rapport aux mesures, et de comparer les logiciels entre eux.

Tableau 9 : Estimateur du facteur unitaire de variance

	Reykjanes	Métrologie
Logiciel	S_0^2	S_0^2
Covadis	1.5826	152.2756
Comp3D	2.1488	192.0968
Columbus local	3.4818	202.0471
Columbus Geodetic3D	1.2366	19.0716
Geolab	1.2890	19.1666
CoMeT	XXXXX	19.4776

Nous pouvons constater que deux groupes de logiciels se dégagent de ce test, d'un coté Columbus Geodetic 3D, Geolab et CoMeT, de l'autre Covadis, Comp3D et Columbus local.

Dans le premier groupe, l'estimateur du facteur unitaire de variance pour Columbus 3D Geodetic et Geolab est similaire pour les deux réseaux. Pour le réseau de la salle de métrologie, CoMeT obtient un estimateur du facteur unitaire de variance du même ordre de grandeur à ces deux premiers logiciels. Nous confirmons que ces trois logiciels sont équivalents en termes de modélisation et pouvons également confirmer le bon fonctionnement du logiciel CoMeT.

Nous constatons que l'estimateur du facteur unitaire de variance est légèrement plus élevé pour Covadis, Comp3D et Columbus local pour le réseau de Reykjanes par rapport aux logiciels utilisant une modélisation « Terre ellipsoïdale ». En revanche pour le réseau de métrologie, nous constatons un écart plus important entre les deux groupes de logiciels. Par ailleurs, nous pouvons classer ces logiciels, ainsi Covadis a un S_0^2 plus faible que Comp3D, celui-ci étant plus faible que Columbus local.

Pour le réseau de métrologie qui est configuré en sifflet, on a des écarts importants entre les logiciels de modélisation «Terre ellipsoïdale » et les autres. Hors pour ce réseau inférieur à 100 mètres, nous devrions trouvés des résultats similaires entre tous les logiciels. En revanche, le réseau de Reykjanes semble disposer d'une bonne configuration géométrique, et on trouve des résultats cohérents aux simulations.

On peut donc supposer que la configuration du réseau a une influence sur l'ajustement des réseaux en particulier pour les logiciels Comp3D, Covadis et Columbus local.

2. Déplacement des points

Nous allons comparer les déplacements des coordonnées des points ajustés qui sont les solutions finales de l'ajustement ainsi que leurs précisions.

2.1. Réseau de métrologie

Pour le réseau de métrologie, les coordonnées approchées des points M2 et M10 qui sont utilisées pour l'ajustement seront considérées comme valeurs de référence. Ces coordonnées ont été déterminées à de nombreuses reprises au cours des travaux pratiques. Nous allons donc comparer le déplacement des coordonnées des points ajustés (résultats des ajustements) par rapport aux coordonnées de référence (Tableau 10).

Tableau 10 : Déplacement des points M2 et M10 - Réseau de métrologie

Référence Geolab	M2			M10		
(En millimètre)	ΔE	ΔN	ΔUp	ΔE	ΔN	ΔUp
Covadis	12,2	15,6	0,0	0,6	1,7	0,1
Comp3D	11,8	15,2	0,1	0,6	1,6	0,7
Columbus local	10,6	15,7	0,1	1,3	0,7	0,0
Columbus Geodetic3D	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1	0,1
CoMeT	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0

Nous observons que les coordonnées ajustées du point M10 du réseau de métrologie sont similaires pour tous les logiciels. Nous constatons un écart de l'ordre 0,5 millimètre en Est et de 1 millimètre en Nord entre d'un coté Columbus local, Covadis et Comp3D et de l'autre Columbus 3D Geodetic, Geolab et CoMeT.

En revanche, il y a des différences importantes sur les coordonnées ajustées du point M2, entre ces deux groupes de logiciels en planimétrie. De l'ordre de 1,2 centimètre en Est et 1,5 centimètre en Nord.

Ici l'envergure du réseau est de 5 x 50 mètres carrés, ces résultats donnent de nouvelles informations par rapport aux tests sur l'influence de la taille du réseau, nous n'observions pas de différences aussi importantes pour des réseaux inférieurs à 100 mètres. Nous pouvons poser l'hypothèse que la configuration géométrique du réseau en sifflet a des répercutions sur l'ajustement pour les logiciels Covadis, Comp3D et Columbus local.

2.2. Réseau de Reykjanes

Pour le réseau de Reykjanes, nous avons quatre points ajustés mais les déplacements observés sont similaires pour les points C4, C5 et C6. Nous avons donc affiché seulement les déplacements du point C4.

Nous comparerons les coordonnées des points ajustés par rapport aux coordonnées ajustées fournies par Geolab qui serviront de référence car nous ne connaissions pas les coordonnées vraies des points dans le Tableau 11.

Pour rappel (voir précédemment), nous ne rentrerons pas plus dans les détails pour l'ajustement du réseau de Reykjanes avec CoMeT.

Tableau 11 : Déplacement des points C2 et C4 - Réseau de Reykjanes

Référence Geolab	C2			C4		
(En millimètre)	ΔE	ΔN	ΔUp	ΔE	ΔN	ΔUp
Covadis	1,0	0,3	0,3	8,9	0,4	1,3
Comp3D	0,5	0,1	0,0	10,8	0,8	0,2
Columbus local	0,3	0,0	0,0	7,8	2,4	0,1
Columbus Geodetic3D	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0

En planimétrie, nous constatons dans le Tableau 11 un écart maximum de 1 millimètre sur les coordonnées du point C2 par rapport aux coordonnées de Geolab. Ce point est situé entre les 2 points fixes à une distance d'une vingtaine de mètres.

Mais pour le point C4, situé à environ 100 mètres des points connus, il y a des écarts centimétriques en Est et millimétriques en Nord pour Columbus local, Covadis et Comp3D par rapport à Geolab et Columbus 3D Geodetic.

Nous confirmons les résultats trouvés précédemment lors du test de l'influence de la taille du chantier pour les écarts planimétrique pour les logiciels Covadis, Comp3D et Columbus local.

Par ailleurs suivant la composante verticale (ΔUp) par rapport à Geolab, Covadis présente la différence de coordonnée altimétrique la plus importante pour le point C4 de 1,3 millimètre. D'après la configuration du réseau ce point est situé à une centaine de mètres des points fixes. C2 a un écart de 3.10^{-4} mètres, celui-ci est situé à une vingtaine de mètres des points C1 et C3.

Covadis, qui ne prend pas en compte la courbure terrestre, présente des différences en altimétrie croissante quand le point s'éloigne des points connus. On retrouve la dégradation de l'ajustement de Covadis en vertical avec l'augmentation de la taille du réseau trouvé dans la partie 3.

D. Bilan

A travers le réseau de Reykjanes, nous avons confirmé les différences établies lors du test de la partie 3 pour des réseaux de 100 mètres. Entre les logiciels de type « Terre ellipsoïdale » et ceux de type « Terre plate » et « Terre sphérique », nous avons constaté un écart de l'ordre de 1 centimètre pour des mesures d'une centaine de mètre sur la planimétrie. Par ailleurs, les résultats sur la composante verticale sont similaires pour tous les logiciels sauf pour Covadis.

Pour le réseau de la salle de métrologie, nous avons constaté des écarts avec les résultats des simulations. Nous avons émis l'hypothèse que la géométrie du réseau a une influence, en plus de la taille du réseau sur l'ajustement pour les logiciels Comp3D, Covadis et Columbus local.

Conclusion

Dans ce travail de fin d'études, l'objectif était dans un premier temps de recenser les divers logiciels d'ajustement de mesures par la méthode des moindres carrés, puis à partir d'une sélection de logiciels, établir les limites de leur utilisation, et les écarts entres les différents modèles. Dans un deuxième temps, le but était également de valider le fonctionnement de CoMeT.

Nous avons d'abord proposé une classification des logiciels d'ajustement en se basant sur les principes de modélisation de la mesure en distinguant trois familles de logiciels d'ajustement par moindres carrés : « Terre plate », « Terre sphérique » et « Terre ellipsoïdale ».

Une étude approfondie de l'ensemble des logiciels présentés n'étant pas réalisable dans la période du stage, une sélection a été nécessaire pour limiter le travail de comparaison. Cette sélection a été réalisée de manière à avoir au moins un logiciel dans chacune des catégories.

Avant de comparer les 5 logiciels sélectionnés Columbus, CoMeT, Comp3D, Covadis et Geolab, une prise en main a été nécessaire ce qui a permis d'établir un descriptif de chaque programme. De cette première étude, nous avons pu établir une synthèse. A partir de laquelle nous avons ensuite pu établir les critères de nos comparaisons que ce soit pour le paramétrage des options ou que ce soit pour l'étude des résultats.

Le premier test sur l'influence de l'envergure du réseau a permis de quantifier les limites des logiciels. On peut cependant distinguer les résultats en fonction de la planimétrie et de l'altimétrie.

Pour la composante verticale, nous avons identifié trois groupes de logiciels, nous avons ainsi :

- Covadis qui ne prend en compte aucune correction de courbure terrestre et modélise mal la composante verticale lorsque la taille du réseau augmente.
- Pour Comp3D qui prend en compte la sphéricité de la terre, les écarts sont significatifs à partir de réseaux supérieurs à 5 kilomètres pour la composante verticale.
- Les trois logiciels de type « Terre ellipsoïdale » donnent les mêmes résultats pour la composante verticale ce qui confirme qu'ils utilisent les mêmes modèles. De plus ils permettent de réaliser des ajustements pour des réseaux de grandes envergures. Dans ce groupe nous pouvons classer également Columbus local. Ce logiciel de type « Terre plate », prend en compte une correction de la courbure terrestre, et il obtient les mêmes résultats pour la composante verticale que les logiciels de types « Terre ellipsoïdale ».

En planimétrie, on a démontré que les résultats étaient similaires pour CoMeT, Geolab et Columbus 3D Geodetic d'une part et pour Comp3D, Covadis et Columbus local d'autre part.

Ainsi les logiciels de type « Terre plate » et « Terre sphérique » donnent des résultats du même ordre de grandeur en planimétrie. Mais ils sont également limités en dimension de réseau. Dans nos simulations au delà de 100 mètres, les écarts étaient supérieurs à 1 centimètre par rapport aux coordonnées vraies.

Par ailleurs, les données de Reykjanes ont permis de valider les simulations. Alors que les données de la salle de métrologie permettent de démontrer que la taille du réseau ne semble pas être le seul facteur d'influence des résultats. Nous avons ainsi pu supposer une influence de la géométrie du réseau pour les logiciels Comp3D, Covadis et Columbus local. Des tests seraient donc à réaliser pour confirmer cette hypothèse.

Ces comparaisons ont également permis de valider de manière globale le mode de calcul « Terre ellipsoïdale » de CoMeT. Mais il reste encore quelques erreurs, et les modifications effectuées au cours du TFE semblent avoir eu des répercutions sur le mode « Terre plate » qui ne fonctionne plus.

De nombreux logiciels n'ont pu être étudiés lors de ce TFE, il reste donc un travail d'analyse à faire. Par ailleurs, les tests ont été réalisés avec des réseaux spécifiques, il faudrait les tester avec d'autres configurations.

Conclusion personnelle :

Ces 5 mois ont été pour moi une approche différente des périodes de cours. Pour ce TFE, j'ai réalisé un travail qui apportera des informations (sur les limites d'utilisation des logiciels, les fonctionnalités des logiciels, …) à d'autres personnes (géomètres-experts, bureau d'études, …). C'est une expérience très enrichissante et motivante sur le plan personnel. En plus, il m'a permis de découvrir en profondeur certains aspects de la topométrie de précision et l'utilisation des logiciels d'ajustement.

La prise en main des logiciels a été la principale difficulté de ce travail, mais c'était une étape essentielle pour la suite de la comparaison. J'ai ainsi pu me rendre compte de l'importance de la compréhension du fonctionnement et du déroulement des calculs pour savoir exploiter au mieux un logiciel.

Cette étude comparative m'a permis également de comprendre le fonctionnement et les risques liés aux différents logiciels. Par ailleurs, cela m'a obligé à travailler avec des remises en causes fréquentes, et reprendre ce travail plusieurs fois afin de l'approfondir et l'enrichir. Cette démarche est fondamentale dans l'approfondissement de mon futur métier.

Bibliographie

1. **DURAND, Stéphane et MOREL, Laurent.** *Mathématiques de l'ingénieur ES1 - Introduction à la méthode des moindres carrés.* 2008.

2. **SILLARD, Patrick.** *Estimation par moindres carrés.* s.l. : Hermès - Lavoisier, 2001.

3. **Trimble Navigation Limited 2010.** Logciel Trimble Geomatics Office - Notes techniques. *Trimble - GPS, Laser, Optics, and Positioning Hardware, Software, and Services.* [En ligne] [Citation : 25 mai 2010.] http://trl.trimble.com/docushare/dsweb/Get/Document-19913/TID11758D-F_TGO_TN_1104_lr.pdf.

4. **Leica Geosystems 2010.** Leica Geo Office - Logiciel pour la topographie et le génie civil - Leica Geosystems - France. *Leica Geosystems - France.* [En ligne] [Citation : 27 mai 2010.] http://www.leica-geosystems.fr/fr/Leica-Geo-Office_4611.htm.

5. **Topcon 1999-2007.** Logiciel de Topographie Standard (SSS). *TOPCON GLOBAL GATEWAY.* [En ligne] [Citation : 25 mai 2010.] http://www.topcon-positioning.eu/fr/index.asp?pageid=fc3a55d327a748559c09c1a23d3225a2.

6. **JSInfo 2008.** TopStation. *JSInfo - Logiciel TopStation : topographie codification profil plan d'intérieur copropriété.* [En ligne] [Citation : 30 mai 2010.] http://www.jsinfo.fr/?.

7. **GEOMEDIA S.A.S.** COVADIS: Le Logiciel de Topographie et de Projets VRD, Infrastructure, Voirie. *GEOMEDIA SA: éditeur de logiciel topographie cartographie VRD SIG sous AutoCAD - COVADIS EdiCAD AutoPISTE Saphir+.* [En ligne] [Citation : 27 mai 2010.] http://www.geo-media.com/fr_covadis.htm.

8. **SETAM Informatique.** TopoLisp© LT Carnet (Geoset), calcul des carnets en bloc ou par polygonales. *SETAM Informatique : CAO/DAO, AutoCAD, Logiciels topographiques.* [En ligne] [Citation : 28 mai 2010.] http://geo-setam.com/produits/prdgeoset/.

9. **Vincenti, Mireille.** *L'auscultation périodique d'une façade en milieu urbain.* 2008. Travail de fin d'études.

10. **GEOMENSURA.** Geomensura. éditeur de logiciels pour l'infrastructure et le VRD. *Geomensura. éditeur de logiciels pour l'infrastructure et le VRD.* [En ligne] [Citation : 30 juin 2010.] http://fr.geomensura.com/.

11. **Best-Fit Computing, Inc.** Best-Fit Computing - COLUMBUS Network Adjustment Software. *Best-Fit Computing - COLUMBUS Network Adjustment Software.* [En ligne] [Citation : 28 mai 2010.] http://www.bestfit.com/index.shtml.

12. **BitWise Ideas Inc.** GeoLab. *GeoLab.* [En ligne] [Citation : 28 mai 2010.] http://www.msearchcorp.com/Products/GeoLab/Index.htm.

13. **Leica Geosystems 2010.** Leica GeoMoS - Logiciel de surveillance GeoMos - Leica Geosystems - France. *Accueil - Leica Geosystems - France.* [En ligne] [Citation : 1 juin 2010.] http://www.leica-geosystems.fr/fr/Leica-GeoMoS_4802.htm.

14. **Office fédéral de topographie swisstopo.** swisstopo: LTOP / LTOPWIN. *swisstopo: swisstopo Page d'accueil.* [En ligne] [Citation : 28 mai 2010.] http://www.swisstopo.admin.ch/internet/swisstopo/fr/home/products/software/products/ltop.html .

15. **GEOTEC GmbH.** GeoTec GmbH Laatzen: Program System PANDA - General Information. *Information about GEOTEC GmbH Geodetic Technologies in Laatzen.* [En ligne] [Citation : 28 mai 2010.] http://www.geotec-gmbh.de/panda/panda_en.html.

16. **New River Kinematics.** Overview. *New River Kinematics.* [En ligne] [Citation : 26 mai 2010.] http://www.kinematics.com/products/spatialanalyzer/overview.html.

17. **DOUCHE, Sébastien.** *Zone de Lancement Ariane 5 - Etude méthodologique des contrôles d'usure des carneaux.* 2002. Travail de fin d'études.

18. **IGN.** *Comp3D : Fondements mathématiques.* 2009.

19. **EMAIN, Geoffroy.** *L'analyse des relevés topographiques de l'ESRF.* 2006. Travail de fin d'études.

20. **JONES, Mark.** *More new Otpions for LGC.* s.l. : CERN internal report, 1990.

21. **McCAIN, Chris.** *Reliability testing and LGC.* s.l. : CERN internal report, 1991.

22. **RAYER, Magalie.** *Analyse technique de la méthode d'auscultation par topographie classique du barrage de Charpal et tests pour une auscultation planimétrique par GNSS.* 2008. Travail de fin d'études.

23. **GUILLAUME, Sébastien, MULLER, Cyril et CATTIN, Paul-Henri.** *TRINET+ - Mode d'emploi.*

24. **DURAND, Stéphane.** *Topométrie de précision ES2.* 2008.

25. **GEOTEC GmbH .** GeoTec GmbH Laatzen: Program System PANDA - Adjustment. *Information about GEOTEC GmbH Geodetic Technologies in Laatzen.* [En ligne] [Citation : 17 06 2010.] http://www.geotec-gmbh.de/panda/aufbe_en.html.

26. **BEST-FIT COMPUTING, INC.** *Columbus - User Manual.* Beaverton, Oregon 97006 USA : s.n., 2009.

27. **©2001 Microsearch Corporation.** *Microsearch GeoLab 2001 - Field Manual.*

28. **Swisstopo.** *Description du programme LTOP - Version94.* 2003.

29. **MOREL, Laurent.** *Géoréférencement.* 2007 - 2008.

30. **Geomedia S.A.** *Calcul topmétrique et Géocodification - Guide de l'utilisateur.*

31. **DURAND, Stéphane.** *Topométrie de précision ES3.* 2009.

32. **BARAKAT, Assaad.** *Mise en oeuvre d'un système d'auscultation de haute précision.* 2007. Travail de fin d'études.

33. **BOUGEARD, Frédéric.** *Surveillance de glissemets de terrains en Martinique par auscultation tachéométrique : génèse, exploitation et évolution des systèmes.* 2009. Travail de fin d'études.

34. **DORE, Jean-François.** *Mise en place d'un réseau d'auscultation sur l'observatoire hydrologique de Ploemeur.* 2009. Travail de fin d'études.

35. **LEICK, Alfred.** *GPS Satellite Surveying.* 3ème édition. s.l. : Wiley, 2004.

COMPARAISON DE LOGICIELS D'AJUSTEMENT DE MESURES TOPOGRAPHIQUES

Les mesures topographiques classiques de distances suivant la pente, de distances zénithales et de lectures horizontales sont utilisées par de nombreux organismes, du cabinet de géomètre expert au bureau d'étude. Ces mesures doivent être traitées pour déterminer les coordonnées des points. Il existe de nombreux logiciels d'ajustement de mesures capable de le faire par la méthode des moindres carrés.

Ainsi nous avons pu référencer de nombreux logiciels d'ajustement. D'un coté, il y a les logiciels commerciaux destinés à la topographie générale, tel que Covadis, TopStation, Géoset ou destinés exclusivement à l'ajustement de réseau avec Columbus, Geolab, LTop, Spatial Analyzer, PANDA, Leica GeoMos. De l'autre, il y a les logiciels non commerciaux développés en interne par des organismes, avec LGC et GCP développés respectivement par le CERN et l'ESRF, Comp3D de l'IGN en collaboration avec Soldata, TRINET+ de la heigh-vd, LRA de AXIS-conseils. Le L2G et Stéphane Durand développe également leur propre logiciel d'ajustement, CoMeT.

Une nouvelle classification de ces logiciels a pu être établie sur la base du type de modélisation utilisé par les logiciels de compensation :

- ***« Terre plate »***, il s'agit de l'hypothèse d'une terre localement plate où l'on considère que les repères locaux associés à chaque point stationné sont parallèles. Dans ce cas, la modélisation des observations est simplifiée et peut être facilement réalisée sous tableur ou dans un quelconque langage de programmation.

- ***« Terre sphérique »***, la surface de la terre est approximée par une sphère de référence dont la surface est orthogonale à la verticale du point situé au milieu du chantier. Dans ce type de modélisation, il est important de préciser la position (latitude) du point situé au milieu du chantier (point central du chantier).

- ***« Terre ellipsoïdale »***, la terre est modélisée par un ellipsoïde de référence, les coordonnées cartésiennes seront exprimées en fonction des coordonnées ellipsoïdales et on ramène les équations d'observation dans le repère cartésien géocentrique lié à l'ellipsoïde de référence

	Terre plate	Terre sphérique	Terre ellipsoïdale
Covadis	✓		
TopStation	✓		
Géoset	✓		
LRA	✓		
Columbus	✓		✓
CoMeT	✓		✓
GCP			✓
Geolab			✓
LGC			✓
LTOP			✓
TRINET+			✓
PANDA	✓	✓	✓
Comp3D		✓	
SpatialAnalyzer	Pas d'information		

Parmi les logiciels recensés, seulement quelques uns sont étudiés dans la suite de ce travail. Afin de réaliser cette sélection, nous avons utilisé notre classement et sélectionné dans chaque catégorie un ou plusieurs logiciels :

- Catégorie « Terre plate » : **Covadis**
- Catégorie « Terre sphérique » : **Comp3D**
- Catégorie « Terre ellipsoïdale » : **CoMeT, Geolab, Colombus**

Avant de réaliser des tests plus poussés sur les résultats obtenus par les différents logiciels, il est important de synthétiser les possibilités offertes par les logiciels en termes de :

- Types de coordonnées acceptés en entrée
- Validation des solutions
- Régions de confiance et de fiabilité
- Types de matrices exportables
- Résultats sur les observations
- Résultats sur les coordonnées

►►►

Nous avons pu établir que les 5 logiciels étudiés permettaient d'obtenir le facteur unitaire de variance. Cependant nous avons mis en évidence que pour Covadis il doit être calculé à partir de l'erreur moyenne quadratique :

$$S_0^2 = \frac{V^t PV}{n-m} = \frac{EMq_0{}^2}{\sigma_{standart}{}^2}$$

Nous constatons que chaque logiciel a ses propres caractéristiques et qu'ils ne donnent pas tous les mêmes informations. Nous pouvons ainsi établir les critères pour les tests :

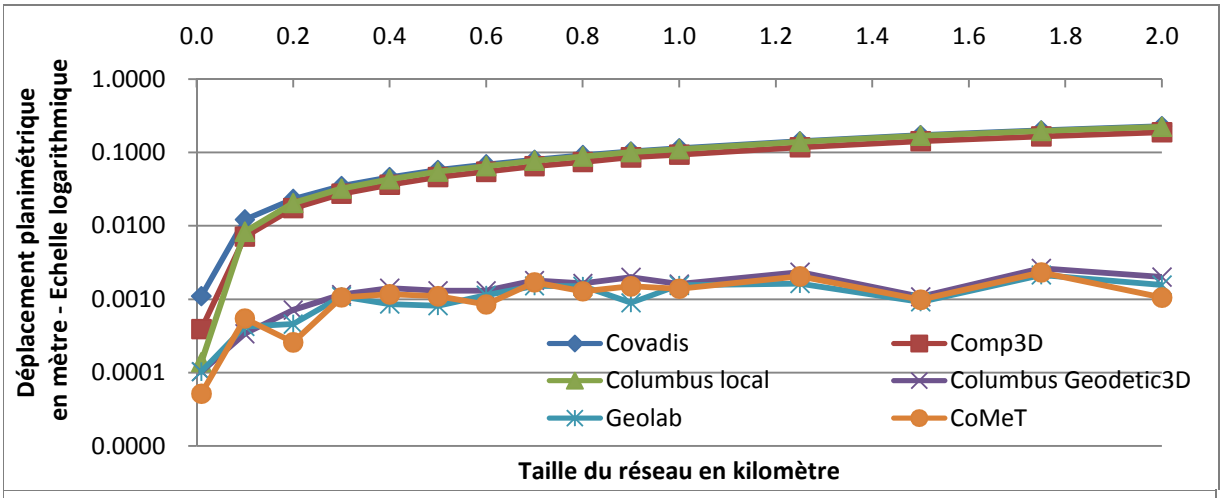
- Utilisation des coordonnées planes selon une projection
- Comparaison des coordonnées finales
- Comparaison du facteur unitaire de variance

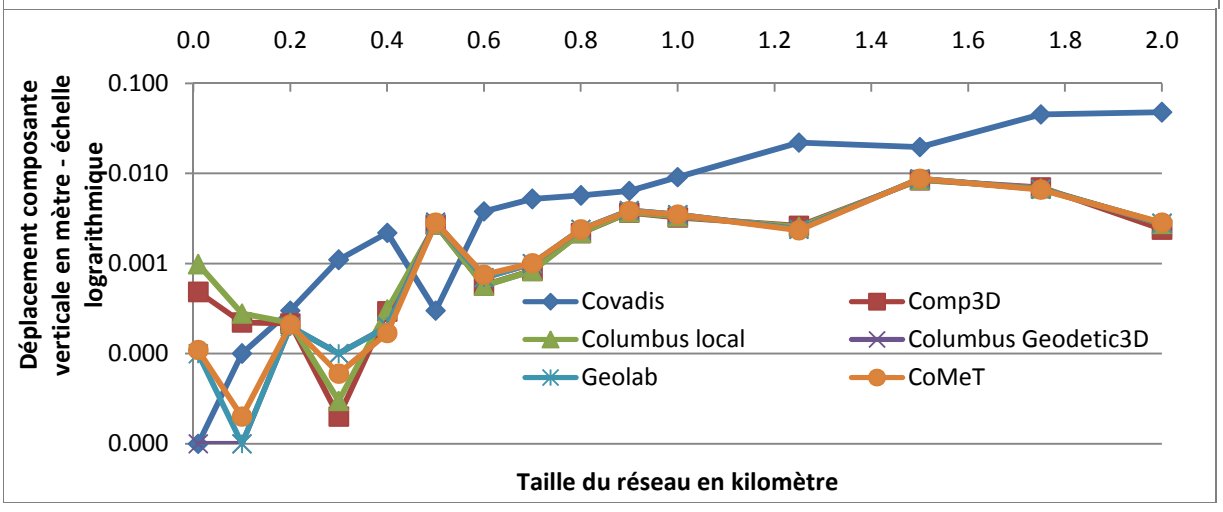
Dans les manuels d'utilisation ou la documentation technique des programmes, nous avons pu lire des mises en garde sur les limites d'utilisation de ces logiciels concernant l'étendue des chantiers.

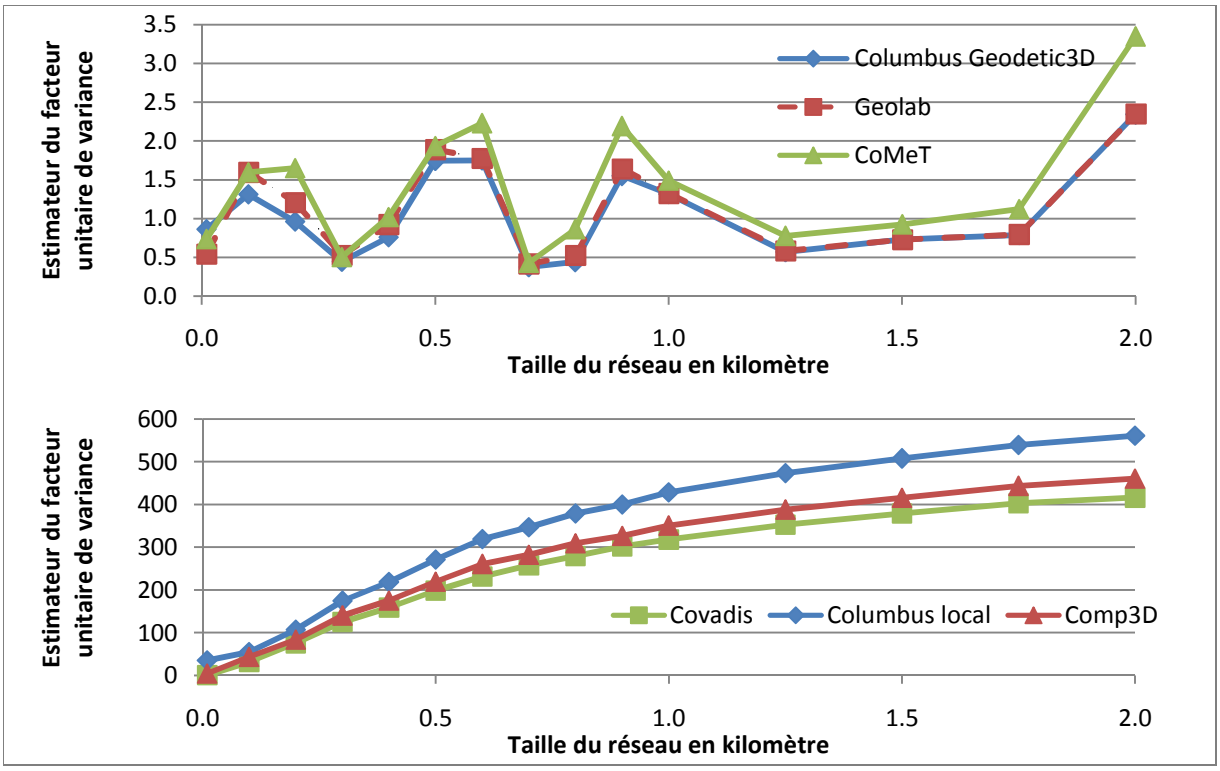
L'objectif principal de cette partie du mémoire est d'étudier le comportement des logiciels en fonction de la dimension du réseau et d'établir les limites d'utilisation des logiciels de façon plus précise. Pour cela nous avons mis en place un réseau sous la forme d'un triangle équilatéral qui permet de tester une taille unique de réseau. Comme il est impossible d'effectuer sur le terrain l'ensemble des mesures nécessaires à nos tests, nous allons générer ces mesures suivant un modèle particulier à partir du logiciel CoMeT.

Pour générer ces mesures sur CoMeT, il faut disposer des coordonnées des points du réseau simulé et préciser les mesures que nous souhaitons réaliser, ainsi que les précisions sur les observations.

▶▶▶







En conclusion de ce test, nous constatons comme prévu que les logiciels Columbus (3D Geodetic), CoMeT et Geolab sont adaptés pour toutes les tailles de chantiers. Mais nous mettons en évidence que leur modélisation sont identiques.

Nous validons également de manière globale la version actuelle de CoMeT pour l'ajustement de type «Terre ellipsoïdale », même si des tests plus approfondis mériteraient d'être menés.

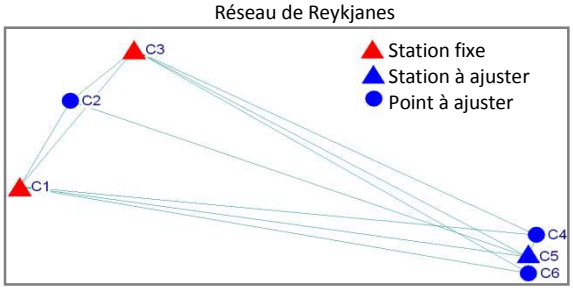
À partir de réseaux de 100 mètres, pour Covadis, Comp3D et Columbus local, on constate des écarts par rapport aux coordonnées vraies supérieurs à 1 centimètre en planimétrie. Ce test tend donc à démontrer que les prescriptions des manuels utilisateurs de Columbus (local) et Comp3D sont trop optimistes quant à la limite d'utilisation de ces logiciels. On confirme également que Covadis est limité à des réseaux d'une centaine de mètre dans le cadre de nos simulations.

En revanche, nous confirmons que la prise en compte de la courbure terrestre permet de traiter l'altimétrie de manière identique à la modélisation ellipsoïdale pour les réseaux de 0 à 2 km pour Comp3D et Columbus local.

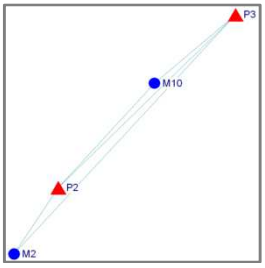
Ces résultats sont valables dans le cadre de notre réseau de simulation mais sont à confirmer par une étude plus poussée ou avec des données réelles.

Le but des tests suivant est de réaliser des ajustements sur des réseaux réels et de comparer en sortie les résultats de chaque logiciel et les différences obtenues pour des réseaux de faible étendue avec des configurations différentes. Nous allons ainsi effectuer deux tests avec deux réseaux de 50 mètres et 100 mètres avec plus de points à ajuster et des contraintes géométriques et environnementales différentes.

Réseau de Reykjanes



Réseau de la salle de métrologie



A travers le réseau de Reykjanes, nous avons confirmé les différences établies lors du test de la partie 3 pour des réseaux de 100 mètres. Entre les logiciels de type « Terre ellipsoïdale » et ceux de type « Terre plate » et « Terre sphérique », nous avons constaté un écart de l'ordre de 1 centimètre pour des mesures d'une centaine de mètre sur la planimétrie. Par ailleurs, les résultats sur la composante verticale sont similaires pour tous les logiciels sauf pour Covadis.

Pour le réseau de la salle de métrologie, nous avons constaté des écarts avec les résultats des simulations. Nous avons émis l'hypothèse que la géométrie du réseau a une influence, en plus de la taille du réseau sur l'ajustement pour les logiciels Comp3D, Covadis et Columbus local.

Ainsi nous avons démontré que les logiciels de type « Terre ellipsoïdale » utilisent des modèles identiques. Tandis que les logiciels de type « Terre plate » et « Terre sphérique » donnent des résultats du même ordre de grandeur en planimétrie. Mais ils sont également limités en dimension de réseau. Dans nos simulations au delà de 100 mètres, les écarts étaient supérieurs à 1 centimètre par rapport aux coordonnées vraies. Les dernières comparaisons démontrent que la taille du réseau ne semble pas être le seul facteur d'influence des résultats. Nous avons ainsi pu supposer une influence de la géométrie du réseau.

Ces comparaisons ont également permis de valider de manière globale le mode de calcul « Terre ellipsoïdale » de CoMeT. Mais il reste encore quelques erreurs.

Nous avons fait de comparaisons sur quelques programmes, mais ils restent de nombreux logiciels permettant l'ajustement de mesures qui méritent d'être étudier.■

Clément GUÉRIN

Annexes

ANNEXE 1 : SERIES DE DONNEES DES FIGURES 11 ET 12 54
ANNEXE 2 : SERIES DE DONNEES DES FIGURES 13 ET 14 55
ANNEXE 3 : SERIES DE DONNEES DES FIGURES 15 ET 16 56

Annexe 1 : Séries de données des figures 11 et 12

Distance planimétrique du point P1 en fonction de la taille du réseau et du logiciel en mètre

Taille du réseau en mètre	Covadis	Comp3D	Columbus local	Columbus Geodetic3D	Geolab	CoMeT
10	0,0011	0,0004	0,0001	0,0001	0,0001	0,0001
100	0,0121	0,0071	0,0083	0,0003	0,0004	0,0005
200	0,0230	0,0175	0,0205	0,0007	0,0005	0,0003
300	0,0350	0,0274	0,0322	0,0012	0,0011	0,0011
400	0,0456	0,0363	0,0429	0,0014	0,0009	0,0012
500	0,0576	0,0464	0,0548	0,0013	0,0008	0,0011
600	0,0682	0,0547	0,0648	0,0013	0,0011	0,0008
700	0,0798	0,0650	0,0769	0,0018	0,0015	0,0017
800	0,0912	0,0741	0,0877	0,0016	0,0015	0,0013
900	0,1035	0,0858	0,1012	0,0020	0,0009	0,0015
1000	0,1141	0,0936	0,1106	0,0016	0,0015	0,0014
1250	0,1430	0,1178	0,1392	0,0023	0,0016	0,0020
1500	0,1724	0,1426	0,1682	0,0011	0,0009	0,0010
1750	0,2005	0,1659	0,1958	0,0026	0,0021	0,0023
2000	0,2295	0,1895	0,2238	0,0020	0,0016	0,0011
5000	0,5740	0,4821	0,5685	0,0014	0,0014	0,0009
10000	1,1421	0,9606	1,1371	0,0021	0,0020	0,0017
25000	2,7735	2,4062	2,9064	0,0024	0,0023	0,0030
50000	4,9833	4,7816	6,2016	0,0483	0,0479	0,0578

Annexe 2 : Séries de données des figures 13 et 14

Distance de la composante verticale du point P1 en fonction de la taille du réseau et du logiciel en mètre

Taille du réseau en mètre	Covadis	Comp3D	Columbus local	Columbus Geodetic3D	Geolab	CoMeT
10	0,0000	0,0005	0,0010	0,0000	0,0001	0,0001
100	0,0001	0,0002	0,0003	0,0000	0,0000	0,0000
200	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002	0,0002
300	0,0011	0,0000	0,0000	0,0001	0,0001	0,0001
400	0,0022	0,0003	0,0003	0,0002	0,0002	0,0002
500	0,0003	0,0027	0,0027	0,0029	0,0028	0,0028
600	0,0038	0,0006	0,0006	0,0007	0,0007	0,0007
700	0,0052	0,0008	0,0008	0,0010	0,0010	0,0010
800	0,0057	0,0022	0,0022	0,0024	0,0024	0,0024
900	0,0064	0,0037	0,0037	0,0039	0,0039	0,0038
1000	0,0091	0,0033	0,0033	0,0035	0,0035	0,0035
1250	0,0221	0,0026	0,0026	0,0024	0,0024	0,0023
1500	0,0197	0,0084	0,0085	0,0087	0,0087	0,0088
1750	0,0453	0,0070	0,0069	0,0067	0,0067	0,0066
2000	0,0477	0,0024	0,0028	0,0028	0,0028	0,0028
5000	0,3193	0,0051	0,0027	0,0034	0,0034	0,0034
10000	1,1065	0,0308	0,0211	0,0245	0,0245	0,0245
25000	7,9645	0,1051	0,0663	0,0665	0,0665	0,0665
50000	31,6206	0,1802	0,0255	0,0256	0,0256	0,0260

Annexe 3 : Séries de données des figures 15 et 16

Estimateur du facteur unitaire de variance en fonction de la taille du réseau et du logiciel

Taille du réseau en mètre	Covadis	Comp3D	Columbus local	Columbus Geodetic3D	Geolab	CoMeT
10	1,0	4,7	35,3	0,9	0,5	0,7
100	31,5	43,4	54,7	1,3	1,6	1,6
200	75,4	84,0	107,0	1,0	1,2	1,7
300	125,1	139,9	174,4	0,4	0,5	0,5
400	159,1	175,3	219,1	0,8	0,9	1,0
500	198,7	219,9	271,5	1,7	1,9	1,9
600	231,8	260,5	319,2	1,8	1,8	2,2
700	258,0	282,5	347,2	0,4	0,4	0,4
800	279,4	309,4	379,3	0,4	0,5	0,9
900	302,0	326,7	400,5	1,5	1,6	2,2
1000	318,3	350,6	428,6	1,3	1,3	1,5
1250	353,3	387,9	473,6	0,6	0,6	0,8
1500	379,5	416,1	507,7	0,7	0,7	0,9
1750	403,5	443,4	540,0	0,8	0,8	1,1
2000	416,5	460,8	561,3	2,3	2,4	3,3
5000	502,1	541,9	664,7	0,5	0,5	0,5
10000	535,0	583,7	725,4	0,1	0,1	0,2
25000	536,4	608,7	836,2	0,5	0,5	0,5
50000	469,5	627,7	1186,1	0,9	0,9	1,4

COMPARAISON DE LOGICIELS D'AJUSTEMENT DE MESURES TOPOGRAPHIQUES

Résumé :

Les mesures topographiques sont utilisées par de nombreux organismes. Ces mesures sont essentiellement des mesures de distances suivant la pente, de distances zénithales et de lectures horizontales. Que ce soit dans le cadre d'un simple lever topographique, d'une auscultation, ou de l'étude de déformations de terrain, ces mesures doivent être traitées pour déterminer les coordonnées des points. Pour cela, il existe de nombreux applicatifs capables de réaliser des calculs topométriques, et de déterminer les coordonnées des points.

Dans notre étude nous allons nous concentrer sur les logiciels qui réalisent des ajustements de mesures par la méthode des moindres carrés. Pour cela nous avons établi une liste non exhaustive de logiciels que nous avons classés en 3 modélisations : « Terre plate », « Terre sphérique », « Terre ellipsoïdale ».

Suite à une étude des possibilités offertes par les logiciels sélectionnés pour la comparaison, nous avons établi que les logiciels de modèle « Terre plate » et « Terre sphérique » sont limités à des réseaux de moins de 100 mètres.

Le L2G développant son propre logiciel d'ajustement, CoMeT, cette étude permet également de valider son fonctionnement.

Mots clés : méthode des moindres carrés, logiciel d'ajustement, classification des logiciels, comparaisons des logiciels, CoMeT.

COMPARISON OF ADJUSTMENT SOFTWARE OF TOPOGRAPHIC MEASUREMENTS

Abstract :

The topographic measurements are used by many agencies. They are essentially measurements of distances along the slope, of zenithal distances and horizontal readings. Whatever the context of a simple topographical survey, an auscultation, or the study of ground deformation, these measurements must be processed to determine the coordinates of points. Thus, many applications can perform calculations surveying, and determine the coordinates of points.

In our study we will focus on the software that carry out the adjustments of measures by means of the method of least squares. For this purpose we have established a non-exhaustive list of software which we classified into three models: "flat Earth", "spherical Earth," "ellipsoidal Earth".

As a consequence of a study of the possibilities offered by the software selected for the comparison. We have established that the software model "flat Earth" and "spherical Earth" are limited to networks of less than 100 meters.

As the L2G developing its own software adjustment, CoMeT, this will also be an opportunity to validate its operation.

Keywords : method of least squares, adjustment software, classification of software, software comparisons, CoMeT.